

Санкт – Петербургский государственный университет

РЕУЦКАЯ Кристина Андреевна

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Опытно – методические работы на примере инженерной 3D – сейсморазведки

Уровень образования: бакалавриат

Направление 05.03.01 «Геология»

Основная образовательная программа СВ.5091.2015 «Геофизика и геохимия»

Профиль «Геофизика»

Научный руководитель: к.геол.-мин.н.,
доцент Жемчужников Евгений Глебович

Рецензент: ведущий инженер
АО НПП «Авиационная и Морская Электроника»
Долотказин Ильдар Ниязьевич

Санкт-Петербург

2019

Оглавление

Введение	3
Теоретическая часть	6
1.1. Основные параметры системы наблюдений и регистрации	6
1.2. Методика расчета систем наблюдений	24
1.3. Общие сведения об объекте работ	31
Практическая часть	39
2.1. Выбор параметров по данным ОМР и анализ данных ОМР	39
Заключение.....	49
Список литературы.....	50

Введение

Важной составляющей сейсморазведки является регистрация волн от изучаемых геологических границ – полевые работы. Методика полевых работ включает выбранные методы, систему наблюдений, технологию работ, а также параметры источников упругих волн, устройств приема и регистрации сейсмических данных. Правильно выбранная методика обеспечивает решение поставленных задач со всей возможной полнотой, за минимальный срок и с наименьшими затратами. Оптимальную методику отличает комплексное использование нескольких методов и схем наблюдений, правильное применение возможностей современной аппаратуры, рациональные технологии проведения полевых работ.

Сейсморазведочные работы применяются на всех стадиях геолого-геофизических работ. В последние годы существенно выросла доля трёхмерной (3D) сейсморазведки, позволяющей получать детальные объёмные изображения земных недр и повысить эффективность исследований в области прогнозирования вещественного состава геологической среды.

Трёхмерная сейсморазведка характеризуется: •

- Высокой детальностью исследований за счет большой плотности информации на единицу площади, дающей возможность сформировать куб сейсмической записи, отображающий практическую непрерывность параметров и атрибутов волнового поля и геологической среды; •
- Существенно большим (в 2 и более раз) эффектом подавления помех по сравнению с 2D при равной кратности накопления; •
- Более высокой надёжностью выделения и трассирования тектонических нарушений и иных границ резкого изменения рельефа отражающих поверхностей; •
- Возможностью изучения характеристик среды, зависящих от направления распространения волн, т. е. пространственной многофакторной анизотропии среды;
- На порядок более высокой по сравнению с 2D пространственной разрешающей способностью, при возрастании стоимости работ лишь в полтора – два раза.

Возможность реализации перечисленных достоинств 3D-сейсморазведки и успешного решения поставленных геологических задач во многом зависит от состава и качества первого этапа работ, который заключается в регистрации [1].

Результаты обработанных и интерпретированных сейсмических данных зависят от многих факторов, перечисленных ранее. Правильно выбранная методика обеспечивает решение поставленных задач со всей возможной полнотой, за минимальный срок и с наименьшими затратами.

Таким образом, **целью** данной работы является выбор итоговых параметров проведения инженерной 3D-сейсморазведки на Нижнетуломском водохранилище.

Задачи:

1. Ознакомление с основными параметрами системы наблюдений и регистрации 3D-сейсморазведки;
2. Ознакомление с методикой расчета систем наблюдений;
3. Выбор параметров по данным опытно – методических работ (ОМР);
4. Анализ влияния выбранных параметров на получаемые данные в программе VISTA;
5. Выбор итоговых параметров системы наблюдений.

Актуальность работы

Результаты данной работы могут быть полезны в повышении качества полевых данных с сейсмическим оборудованием, а также снижении непродуктивных затрат времени.

Фактический материал и личный вклад

Основой для выпускной квалификационной работы стали материалы Договора между ООО «Ларгео ТХ» и ООО «Сейсмо-Шельф», полученные в ходе проведения инженерных сейсморазведочных изысканий под строительство ж/д моста на р.Тулома Мурманской области. Автор принимал участие в выборе параметров систем наблюдений по данным ОМР и анализе выбранных параметров на получаемые данные.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю кандидату геолого – минералогических наук Евгению Глебовичу Жемчужникову за помощь в написании данной работы.

Краткое содержание

Во **введении** дана краткая характеристика 3D – сейсморазведки и отмечена важность выбора итоговых параметров по данным ОМР при проведения сейсморазведочных работ, на основе чего сформулированы цель и задачи, а также актуальность данной работы.

Первая глава представляет собой теоретический обзор, в котором говорится об основных параметрах площадных систем наблюдений и регистрации, помимо этого дается краткая характеристика различных типов систем наблюдений, используемых в 3D – сейсморазведке. Также в данной главе приводится методика расчета ортогональной системы наблюдений, используемой при проведении инженерных работ на р.Тулома. Представлены сведения об объекте работ, включающие физико – географические и геолого – геоморфологические условия; перечислены методические и технологические особенности работ.

Вторая глава посвящена практической части, заключающейся в выборе параметров по данным опытно – методических работ и их анализе. В результате данного этапа работ были получены итоговые параметры для системы наблюдений.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

Теоретическая часть

1.1. Основные параметры системы наблюдений и регистрации

Состав сейсморегистрирующего канала

Сейсморегистрирующий канал (СК) состоит из пяти последовательно действующих устройств (рис.1.): сейсмоприемник (С), усилитель (У), фильтр (Ф), аналого-цифровой преобразователь (П) и регистратор (Р).

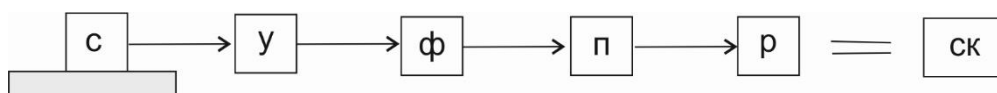


Рисунок 1 Составляющие устройства сейсморегистрирующего канала [2]

Сейсмоприемники служат датчиками волнового поля, преобразуя механические колебания частиц среды в электрический сигнал. В наземной сейсморазведке в основном применяются инерционные приемники электродинамического типа, использующие явление электромагнитной индукции для преобразования колебаний почвы в электрические колебания. Чувствительный элемент сейсмоприемника представляет собой катушку с намотанным медным проводом. К корпусу приемника гибкими пружинами подвешивается катушка и совершает колебания вдоль вертикальной или горизонтальной оси. В сейсмоприемниках используются ирисовые пружины, блокирующие движение катушки вдоль любого направления, кроме главной оси приборов. При значительном наклоне корпуса приемника он теряет свою функциональность.

Колебания корпуса приемника через пружины повторяются катушкой, но с временной задержкой, вызванной инерцией. Когда приемник испытывает колебательные движения, катушка перемещается относительно постоянного магнита, встроенного в корпус приемника. Явление электромагнитной индукции приводит к возникновению электрического тока в проводе катушки [2].

При погружении приемника в грунт с помощью штыря, встроенного в корпус, линия, проходящая через него не должна отклоняться более чем на 5° от вертикального направления, так как снижаются значения принимаемых колебаний [2,5].

На выходе сейсмоприемника электрические колебания могут быть ослаблены, и такие сигналы невозможно записать без значительного усиления, достигающего при необходимости уровня 120-140 дБ (10^6 - 10^7 раз). Большая часть этого уровня

реализуется на конечном этапе прохождения сигналов в канале записи (в процессе аналого-цифрового преобразования). Поэтому аналоговый усилитель записи, принимающий сигналы от сейсмоприемника называется предварительным [2,5].

Ранее практиковалось частотная селекция усиленных колебаний при помощи различных фильтров (граничных, полосовых, режекторных, антиаляйсинговых). Фильтры подавляют колебания на частотах, где заведомо преобладают волны-помехи, для повышения отношения сигнал/помеха до аналого – цифрового преобразования колебаний. В настоящее время запись ведется на открытый канал: она не подвергается никакой фильтрации кроме антиаляйсинговой – таковая включается автоматически при задании шага дискретизации записи. Обычно частота антиаляйсингового среза равна 0,7-0,8 частоты Найквиста выбранного шага дискретизации [2].

При цифровой записи усиленные и отфильтрованные колебания поступают в аналого – цифровой преобразователь (АЦП), работающий по Δ - Σ технологии (что позволяет сразу вести демультимплексированную запись. После этого колебания преобразуются в равномерную последовательность дискретных отсчетов, представленных в двоичном цифровом коде [2,6].

Регистратор является последним устройством аппаратного канала. В нем сейсмические колебания записываются на физический носитель.

Системы наблюдений

Системой наблюдения (СН) называется описание взаимного расположения пунктов возбуждения (S_p) и пунктов приема (R_p) колебаний. Она образуется при последовательном перемещении базы наблюдений (темплейта), состоящей из сейсмических источников и сейсмической расстановки – совокупности все пунктов приема, в которых одновременно записываются колебания от единого источника. Системы наблюдений различаются по следующим показателям: размерность, компонентность, полнота, регулярность, конфигурация, кратность и др. [5].

Размерность системы наблюдений определяется пространством размещения S_p и R_p . Когда они расположены вдоль одной линии – систему наблюдений называют профильной или 2D сейсморазведкой. Такое профилирование выполняется просто и экономично, но оно имеет принципиальный недостаток: по линейным наблюдениям объемного сейсмического поля исследуемого объекта невозможно однозначно определить его пространственное положение. Эта задача решается площадной (пространственной, объемной, 3D) сейсморазведкой. В таком случае S_p и R_p

располагают на дневной поверхности таким образом, чтобы с необходимой детальностью наблюдать объемное волновое поле в его горизонтальном сечении. Площадные СН обходятся дороже линейных, но высокая информативность и достоверность получаемых результатов делает их применение экономически оправданным при детальных исследованиях сложных и перспективных геологических объектов [2].

Основные параметры систем наблюдений

Поверхность наблюдений – есть поверхность, по которой производят постановку точек отстрела и приема;

Поверхность приведения – есть поверхность, к которой приводят результаты геофизических работ;

Профиль (PR) – линия, по которой намереваются получить временной или глубинный разрез;

Линии приема и отстрела (RL, SL) – линии, по которым будут перемещаться транспортные средства (ТС), осуществляющие постановку/снятие сейсмоприемников и возбуждение колебаний;

Точки приема и отстрела (Rp, Sp) – точки (пикеты) на местности (акватории) в которых должны быть поставлены сейсмоприемники или возбуждены колебания;

Интервал линий (шаг линий) (RLi, SLi) – расстояние между соседними линиями приема или отстрела, может быть переменным;

Интервал точек (шаг точек) (Ri, Si) – расстояние между соседними точками приема или отстрела, может быть переменным.

Плотность точек отстрела (Source Point Density) – плотность отстрела, измеряется в числе точек отстрела на 1 км^2 ;

Инлайн (in-line) – направление по линии приема. Хотя сейсмические данные обязаны своим появлением двум точкам (отстрела и приема), точки и линии приема имеют все же преимущественное положение. Это объясняется тем, что, имея только приемную систему (без взрыв-пункта) сейсмограммы все же будут получены (записи промышленного шума, микросейсм) – на этом основана пассивная сейсмика. Но при

наличии только взрыв-пункта (без приемной системы) никакие сейсмограммы получены быть не могут;

Кросслайн (cross-line, x-line) – направление по выбранному азимуту;

Вынос линий отстрела (dSL) – вынос линий отстрела за крайнюю линию приема, может быть больше, меньше, равным нулю;

Вынос линий приема (dRL) – вынос линий приема за крайнюю линию отстрела, может быть больше, меньше, равным нулю;

Взрыв-пункт (shooter) – совокупность оборудования и ПО, осуществляющая возбуждение колебаний последовательно от пикета к пикету;

Вертикальное суммирование (накопление) (vertical stack) – многократные подрывы на одном и том же пикете. Сейсмограммы, полученные от каждого подрыва, суммируются; соотношение сигнал/помеха полученной суммарной с/граммы пропорционально квадратному корню из количества подрывов;

Сеймостанция (рекордер, dog-house) – совокупность оборудования и ПО, осуществляющая прием и регистрацию колебаний со всех сейсмоприемников;

Расстановка – по умолчанию: активная расстановка, т.е. та, сейсмоприемники которой передают свои данные на сеймостанцию. Синонимы: шаблон, патч (patch);

Темплейт (template) – совокупность расстановки и точки (точек) отстрела, из которых она отстреливается;

Салво (salvo) – группа несовпадающих точек отстрела, которые отстреливают данную расстановку;

Бокс (Unit cell) – при 3D работах: параллелограмм, образованный двумя соседними линиями приема и отстрела;

Офсет (offset) – вектор с началом в точке отстрела и концом в точке приема. По умолчанию под этим термином имеют в виду проекцию данного вектора на горизонтальную плоскость (горизонтальный офсет), синоним – удаление. При проведении морских работ на больших глубинах с донными нодами следует различать наклонный офсет и его горизонтальную проекцию, ввиду значительной разницы их длин;

Минимальный офсет – самый короткий вектор точка отстрела – точка приема;

Максимальный офсет – самый длинный вектор точка отстрела – точка приема;

Максимальный минимальный офсет – диагональ бокса. Величина этого офсета вычисляется из условия получения данных, обеспечивающих надежное изучение самого мелко залегающего целевого горизонта;

Минимальный максимальный офсет – минимально-допустимая длина максимального офсета. Величина этого офсета вычисляется из условия получения данных, обеспечивающих надежное изучение самого глубоко залегающего целевого горизонта;

Средняя точка (СТ) – середина горизонтального офсета;

Общая средняя точка (ОСТ) – при проектной регулярной сети наблюдений середины горизонтальных офсетов многих пар отстрел-прием совпадают. Таким образом, ОСТ является именно общей точкой для множества горизонтальных офсетов;

Общая точка отражения (ОТО) – элементарная площадка целевого горизонта, на которой претерпели отражения сейсмические лучи, принадлежащие различным парам источник-приемник. При горизонтальном залегании целевого горизонта ОТО совпадает с ОСТ;

Сеть средних точек (сеть СТ) – сеть средних точек полностью определяется сетями приема и отстрела. При регулярности последних, сеть СТ также регулярна.

Бин (bin) – элементарный дискрет пространственного изучения геологической среды на объекте. Бин (наземный) представляет собой площадку произвольной формы и размера на поверхности наблюдений. Бин обладает свойством: все трассы, записанные на офсетах, имеющих свою среднюю точку в его пределах (эта совокупность трасс образует сейсмограмму ОСТ) после соответствующей обработки обязаны сложиться в одну суммотрассу (горизонтальное суммирование). Суммотрасса присваивается центру бина. Совокупность всех суммотрасс объекта представляют собой временной разрез (при 2D работах) или временной куб-сумму (при 3D работах). Сеть бинов совпадает с сетью СТ, при этом одна ОСТ сети средних точек располагается в центре бина. Минимальный размер непустого бина (т.е. содержащего минимум одну СТ) равен $(R_i/2) \cdot (S_i/2)$;

Супербин (Super Bin) – представляет собой, обычно квадратную группу соседних бинов, например, от $4(2 \times 2)$ до $100(10 \times 10)$. Группирование бинов используется для скоростного анализа $V_{огт}$, вычисления статических поправок, подавления кратных волн и в некоторых алгоритмах подавления шума;

Кратность (fold) – одно из ключевых понятий системы наблюдений. Полная кратность есть количество средних точек (СТ), попавших в пределы бина. При горизонтальном залегании целевого горизонта кратность есть количество наблюдений данного бина (глубинной площадки). В общем случае, полная кратность переменна по объекту.

При увеличении размера бина кратность в нем растет пропорционально площади бина. Следовательно, растет соотношение сигнал/помеха: пропорционально корню квадратному из кратности (при нормальном распределении случайного шума), а значит, возрастает надежность выделения полезных отражений на фоне помех – улучшается изученность целевого горизонта. Обратной стороной увеличения размера бина является снижение горизонтальной детальности исследований, т.к. одна суммотрасса итогового куба будет приходиться на все большую площадь объекта. Кроме того, форма реальных целевых горизонтов далека от горизонтальной плоскости. Поэтому в большом бине импульсы отражений от данного горизонта на различных трассах будут иметь значительные относительные сдвиги, тем большие, чем больше перепад глубины горизонта в пределах бина. Следовательно, при суммировании этих трасс, суммарный импульс на суммотрассе «размажется» – получит сильно завышенный период (снижение вертикальной детальности), вплоть до полного исчезновения полезного импульса отражения.

Таким образом, с ростом размера бина, имеют место две противоположно направленные тенденции, положительная: возрастает кратность; отрицательная: снижается горизонтальная и вертикальная детальность исследований. Разрешение дилеммы видится в следующем: уменьшать размер бина (тем самым повышая детальность разреза (куба)), но увеличивать кратность в нем (тем самым повышая выраженность горизонтов на фоне помех). Технологически это означает повышение плотности средних точек (СТ), а значит увеличение плотности сети приема и отстрела: с/приемники и точки отстрела придется ставить чаще, что приведет к росту трудозатрат, следовательно, и себестоимости проекта.

Кратность инлайн (fold in-line) – кратность инлайн есть количество средних точек (СТ), попавших в пределы бина. При этом в бине учитываются только те СТ, которые созданы офсетами с концами на одной из линий приема;

Кратность кросслайн (fold x-line) – кратность кросслайн есть количество средних точек (СТ), попавших в пределы бина. При этом в бине учитываются только те СТ, которые созданы офсетом с началами на одной из линий отстрела.

Полная кратность (fold) в бине равна произведению кратностей инлайн и кросслайн в этом бине.

Диапазон офсетов (offset range) – одно из ключевых понятий системы наблюдений. Зачастую требуется вычислить не полную кратность, а кратность, созданную только офсетом определенного диапазона (как по длине, так и по азимуту). Это объясняется тем, что трассы, записанные на офсетах малых и больших длин, не несут полезной информации для обработки по графу метода отраженных волн (МОВ).

Диапазон офсетов по длине (length-range). Малые офсеты (порядка величин шагов приема и отстрела) отягощены интенсивными помехами поверхностных и звуковых волн, порождаемых источником, а поэтому непригодны для обработки.

Как известно, преломленные волны на границе раздела возникают при падении на нее волны под критическим углом и положе. Для большинства типичных осадочных разрезов этот угол составляет 20° - 35° от нормали к границе. Таким образом, годографы волн, отраженных под большими углами, будут перекрыты интенсивным цугом преломленных волн; обработка докритических отражений будет практически невозможна. Поэтому при изучении целевого горизонта ценны только отражения, записанные на таких офсетах, лучи которых падают (и отражаются) под углом не более критического; такие офсеты называются докритическими. Для большинства типичных осадочных разрезов максимальная длина докритического офсета (X_{mute}) для данного горизонта равна 1,0-1,3 от его глубины. Трассы, записанные на больших офсетах, не будут иметь пригодного для обработки отражения от этого горизонта. Верхний предел длины докритических офсетов будет уменьшаться с уменьшением глубины целевого горизонта.

Поэтому практическую ценность представляют офсеты в интервале примерно от 50-100м до максимального докритического. Кратность (полезная), вычисленная по ним, естественно, будет ниже полной кратности. Истинную полезную кратность можно определить только по фактическим сейсмограммам ОСТ, подсчитав по ним количество трасс, несущих отражения от целевых горизонтов. Например, пусть количество трасс, несущих отражения от горизонта-1, равно 14; от более глубокого горизонта-2: 23 и т.д. Тогда полезная кратность на горизонте-1 равна 14, на горизонте-2: 23 и т.д.

Тем не менее, данные, содержащие закритические офсеты, оказываются полезными при обработке по графу преломленных волн (МПВ) и при томографии.

Диапазон офсетов по азимуту (azimuth-range). При работах в районах со сложной разрывной тектоникой или при наличии сильно складчатых структур выдержанного простирания данные, записанные на офсетах, субпараллельных простиранию складок или сместителя, могут иметь очень низкое качество, вплоть до полного отсутствия отражений (будут записаны только микросейсмы и поверхностные волны), поскольку акустически жесткая плоскость сместителя будет отражать падающие на нее лучи за пределы приемной расстановки, или вообще, вниз от поверхности наблюдений. Поэтому офсеты таких азимутов не должны участвовать в накоплении кратности в бине, т.к. они не дают полезных отражений от целевых горизонтов.

Полоса набора кратности (Fold Taper). В пределах контура участка работ должна быть получена полная проектная кратность, поэтому фактическая область работ должна быть обширнее, чем проектный участок. В пределах добавочной полосы, окаймляющей проектный участок, кратность возрастает от 1 на краю полосы до проектной кратности на контуре проектного участка.

Апертура миграции (Migration Apron). Добавочная полоса, которая должна быть добавлена снаружи к проектному участку, чтобы в его пределах можно было провести полноценную глубинную миграцию.

В итоге, фактические расстановки точек приема и отстрела осуществляются в пределах контура проектного участка плюс добавочная полоса, ширина которой есть максимум из ширин полосы набора кратности и апертуры миграции [6].

Площадные системы наблюдений 3D сейсморазведки

При проведении сейсморазведочных работ используется ряд систем наблюдений 3D:

- Ортогональные (крестовые) системы, имеющие взаимно перпендикулярное расположение линий пунктов возбуждения (SL) и линий пунктов приема (RL) (рис. 2 а).
- Системы с наклонным положением SL, в которых SL расположены к RL под углом, отличным от 90° (рис. 2 б).
- Системы типа «кирпич», состоящие из непрерывных параллельных RL и прерывных участков SL, расположенных ортогонально RL в шахматном порядке (рис. 2 в).

- Системы типа «зигзаг», представляющие собой совокупность параллельных RL и зигзагообразных SL (рис. 2 г).
- Системы типа «кнопка», в которых R_p заполняют ячейки, а SL расположены прямолинейно и параллельно (рис. 2 д).
- Параллельные системы, обычно применяющиеся при морских работах, в которых SL параллельны RL (рис. 2 е).
- Радиальные системы в виде ряда радиальных профилей как S_p , так и R_p (рис. 3 а).
- Круговые системы, составленные концентрическими окружностями SL и RL (рис. 3 б).
- Системы с псевдослучайным расположением пунктов, базирующиеся на одной из вышеперечисленных систем и отличающиеся от них внесением элемента случайности, т. е. случайного отклонения S_p и R_p от их проектного положения в регулярных системах в пределах заданного радиуса отклонения (рис. 3 в) [1].

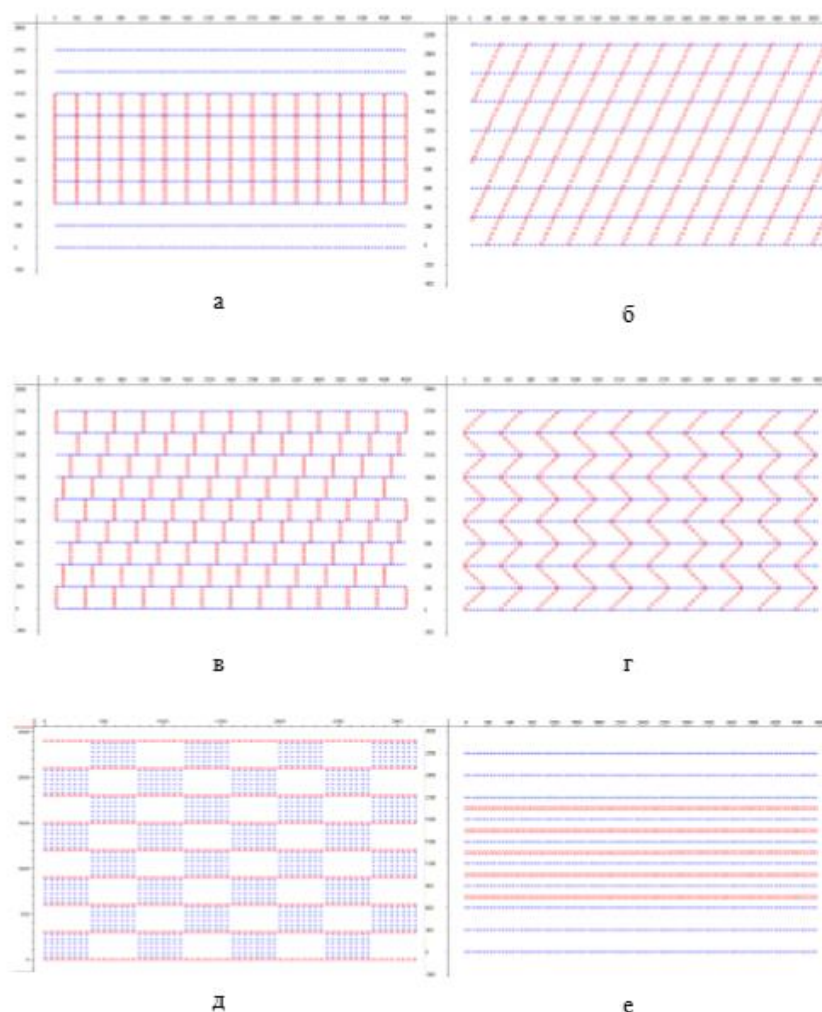


Рисунок 2 Примеры систем наблюдений с регулярным расположением пунктов. а) - ортогональная; б) – с наклонным положением SL; в) – кирпич; г) – зигзаг; д) – кнопка;

е) – с параллельным расположением SL относительно RL. Красным показаны Sp, синим – Rp [1].

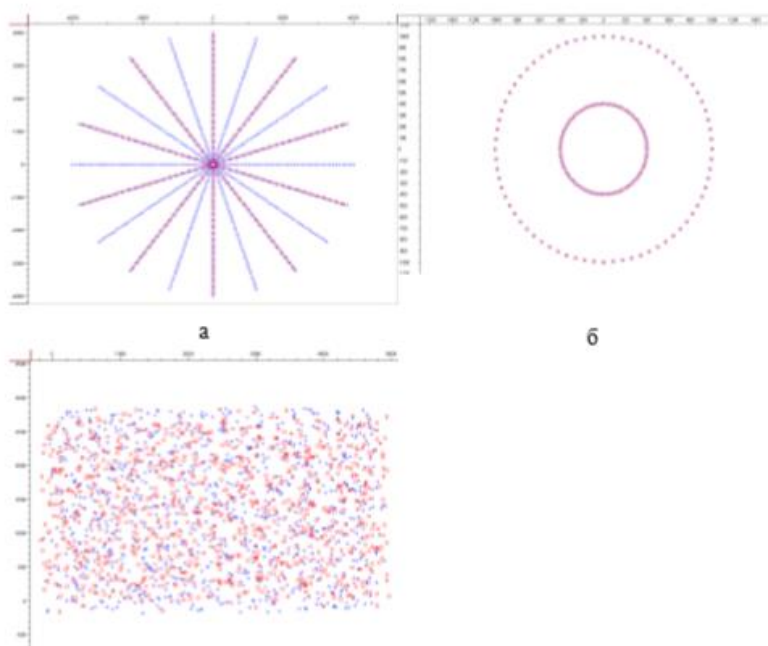


Рисунок 3 Примеры систем наблюдений с непрямоугольным расположением пунктов. а) – радиальная; б) – кольцевая; в) – с псевдослучайным расположением пунктов. Красным цветом выделены Sp, синим – Rp [1].

Крестовые (ортогональные) системы наблюдений

Наиболее часто используют регулярные системы наблюдений крестового типа, вследствие технологичности и минимальной стоимости обработки (минимальные затраты по перемещению приёмного оборудования, простота разбивки и привязки профилей). Система представляет совокупность взаимно перпендикулярных линий приёма и возбуждения. Координатную ось x ориентируют вдоль линии приёма, y – вдоль линии возбуждения. Площадную базу наблюдений в таком случае называют блоком и состоит она из многоканальной сейсмической расстановки приемников – база приёма и совокупности источников – база возбуждения [1,5].

Сейсмическая расстановка состоит из n параллельных линий, на каждой из которых размещаются N пунктов приёма с шагом Δx_{Rp} . Канальность H данной расстановки равна $H=nN$. Расстояние между линиями приёма, т.е. их шаг по оси y , определяется параметром Δy_{Rp} . Прямоугольная H -канальная приемная расстановка имеет длину $L_{xRp} = (N-1) \Delta x_{Rp}$ и ширину $L_{yRp} = (n-1) \Delta y_{Rp}$. Блок содержит m линий источников, на каждой из которых расположены M пунктов возбуждения с шагом Δy_{Sp} . Расстояние между соседними

линиями возбуждения - Δx_{Sp} . Прямоугольная база возбуждения будет имеет размеры $L_{ySp} \times L_{xSp}$, где $L_{ySp} = (M-1) \Delta y_{Sp}$ и $L_{xSp} = (m-1) \Delta x_{Sp}$. Взаимное расположение баз возбуждения и приема задается параметрами - P_x и P_y . Эти параметры определяют в координатах x и y смещение центра базы возбуждения относительно центра базы приема [2].

В площадных системах наблюдений дистанция характеризуется как величиной l от R_p до S_p , так и своим направлением на плоскости (x, y) , т.е. дистанция является вектором \vec{l} . Он определяет, как свойства площадных систем наблюдений, так и особенности обработки полевых записей в 3D сейсморазведке [2].

Выше были названы параметры, определяющие конфигурацию площадной базы наблюдения крестового типа. После того как блок отработан, его перемещают на следующую позицию, сдвигая вдоль оси x на интервал Δx_6 – шаг продольного сдвига блока. В результате таких последовательный перемещений блока на исследуемой площади образуется продольная полоса, равномерно заполненная общими средними точками по прямоугольной сетке с шагом $\Delta x_{ост}$ и $\Delta y_{ост}$. Ширина полосы общий средних точек $L_{y_{ост}} = \frac{1}{2} (L_{ySp} + L_{yRp})$.

В полосе ОСТ кратность перекрытия вдоль оси x – продольная кратность K_x составляет:

$$K_x = \frac{N}{2d_x}, (1.1)$$

где $d_x = \frac{\Delta x_B}{\Delta x_{Rp}}$. Также аналогичным образом происходит образование краевых зон неполной кратности в начальной и конечной частях полосы.

Кратность перекрытия в полосе вдоль оси y – поперечная кратность K_y , зависит от числа M источников в линии возбуждения, количества n линий приема и их относительно шага d_y :

$$K_y = \min \left\{ \frac{M}{d_y}, n \right\}, (1.2)$$

$$\text{где } d_y = \frac{\Delta y_{Rp}}{\Delta y_{Sp}}.$$

После завершения одной продольной полосы площадной блок смещают в поперечном направлении на величину Δy_B – шаг поперечного сдвига блока и выполняют наблюдения на соседней полосе, параллельной предыдущей. Шаг Δy_B должен обеспечивать постоянство требуемой величины кратность K_y для всех ОСТ на исследуемой площади. В зависимости от конфигураций базы приема и базы возбуждения

это обычно достигается применением одной из двух схем перекрытия соседних полос – перекрытия линий возбуждения или перекрытия линий приема. Полная (двумерная) кратность перекрытия K в площадной системе наблюдений равна произведению продольной и поперечной составляющих:

$$K = K_x * K_y \quad (1.3)$$

Таким образом, регулярная система наблюдений ортогонального типа полностью определена 12 параметрами:

- $n, N, \Delta x_{Rp}, \Delta y_{Rp}$ – параметры базы приема;
- $m, M, \Delta x_{Sp}, \Delta y_{Sp}$ – параметры базы возбуждения;
- P_x, P_y – параметры сдвига центра базы возбуждения относительно центра базы приема;
- $\Delta x_B, \Delta y_B$ – параметры продольного и поперечного сдвигов блока.

В реальных условиях при проведении полевых работ 3D сейсморазведки не всегда возможно регулярное расположение S_p и R_p . В результате чего нарушается равномерность сети ОСТ, что создает определенные трудности при обработке и анализе сейсмических данных. Для устранения этих осложнений производят регуляризацию сети ОСТ – бинирование. При этом на исследуемой площади создается регулярная сеть прямоугольных площадок – бинов. Размеры бинов по осям x и y , как правило, равны плановому шагу точек ОСТ по соответствующим направлениям, т.е. соотношениям $\Delta x_{ост}, \Delta y_{ост}$. Все фактические средние точки, попадающие на площадку одного бина, относятся к ее центру, который считается для них общей средней точкой. Для каждого бина фактическая кратность перекрытия определяется количеством попавших в нее средних точек [2].

Площадные системы наблюдений крестового типа получили наиболее широкое применение благодаря простоте их геометрии и технологичности реализации. Однако в большинстве случаев при сложных поверхностных или глубинных условиях и ограниченной доступности исследуемых участков используют неортогональные и неравномерные системы наблюдений.

Системы с наклонным расположением линий

Непрямоугольное расположение линий приема и возбуждения используется для получения более равномерного спектра удалений при сохранении непрерывности линий возбуждения. Такие виды геометрии обеспечивают возможности простой установки и сбора сейсмоприемников из-за своей сплошности, однако, в них варьируются расстояния

между пунктами взрыва, что осложняет топографо-геодезические работы и разбивку профилей. В целом, отработке систем с наклонным положением линий не сильно удорожает съёмку, и может быть использована при необходимости обогащения спектральных характеристик системы наблюдений [1].

В большинстве случаев изменяется азимут линий возбуждения, а не приёма. Т.о. в случае наклонного проложения линий повторяемость определяется азимутом.

Шаг SP определяется следующим образом:

$$\Delta \text{ПВ} = \frac{2B_y}{\cos \theta}, \quad (1.4)$$

Где B_y – размер бина, θ – азимут SL.

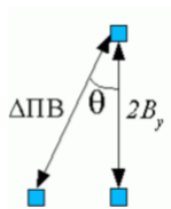


Рисунок 4 Схема к определению шага пунктов взрыва.

Диапазон возможных значений азимута определяется требованием обеспечения непрерывной кратности [1].

$$\theta = \arctg \frac{(1 \div n)}{n}, \quad (1.5)$$

Где $n = \frac{\Delta SL}{\Delta R_p}$ – число пунктов приема в элементарной ячейке, ограниченной соседними линиями S_p и R_p . На практике сейсморазведочных работ используются углы в 45° и 26.56° , что соответствует повторяемости на интервале одной и двух расстановок по вертикали соответственно [1].

Рассмотрим влияние азимута линий возбуждения на формирование интегральных характеристик системы наблюдений на примере стандартных параметров съёмки 3D: шаг SL = шаг RL = 300 м, шаг S_p = шаг R_p = 50 м. Используем широкоазимутальную расстановку: 10 линий по 96 каналов в каждой (всего 960 каналов). Для данных характеристик возможна отработка шести схем наклонного положения SL (таблица 1). Ограничение возможного количества вариантов рассчитывается по формуле: $n = 300/50 = 6$, $\theta = \arctg (1 \div 6)/6$.

Таблица 1

Возможные параметры систем с наклонным
расположением линий [1]

Азимут SL, градусы	0	9,46	18,44	26,56	33,69	39,8	45
Шаг Sp в линии, м	50	50,69	52,71	55,9	60,9	65,09	70,71
Расстояние между SL	300	295,92	284,6	268,33	249,62	230,47	212,13
Смещение Rp после отработки полосы ФН							
При обработке 6 Sp в активной расстановке	0	1	2	3	4	5	6
При обработке 30 Sp в активной расстановке	0	5	10	15	20	25	30
Максимальное удаление Sp-Rp							
При обработке 6 Sp в активной расстановке		2838	2839	2881	2882	2889	
При обработке 30 Sp в активной расстановке		3262	3346	3465	3586	3635	

Как видно из таблицы 1 для сохранения заданных размеров бина увеличение азимута SL приводит к увеличению расстояния между пикетами и уменьшению расстояния по перпендикуляру между линиями. При этом, число Sp остаётся приблизительно постоянным и не зависящим от азимута θ .

Системы типа «кирпич»

Данная система наблюдений разработана для получения более равномерных по сравнению с крестовыми системами распределений удалений. Сущность системы наблюдений «кирпич» заключается в проектировании прерывных SL, расположенных по площади в порядке, близком к шахматному. При этом SL имеют ступенчатую конфигурацию. Параметр "ступень" позволяет варьировать плотность расположения SP на площади работ. Применительно к ортогональным системам значение ступени равно единице; для систем типа «кирпич» значение меняется от 0.2 до 0.5 ДЛПВ. Увеличение значения ступени приводит к необходимости уменьшения шага SL и перепадам в спектре удалений [1,6].

Системы типа «кирпич» требуют уменьшенного по сравнению с ортогональными системами шага SL для обеспечения равномерной кратности.

Однако, возрастающая дискретность участков SL приводит к усложнению отработки площади. Это связано с появлением нескольких альтернативных схем нумераций линии и к необходимости организации большого числа переездов через кабели RL в техническом плане. Существуют методики, позволяющие сглаживать дискретность линий. Одним из таких вариантов является смещение S_p , ближайших к RL, в сторону соседней SL. При этом уменьшается необходимое количество переездов через RL.

По сравнению с системами с наклонным положением SL системы «кирпич» имеют значительно меньшее максимально-минимальное удаление В среднем значение максимально-минимального удаления уменьшается приблизительно на 20%. Таким образом, системы типа «кирпич» предоставляют возможность увеличения интервала между приёмными линиями при сохранении хорошего распределения азимутов и удалений. В то же время существенно усложняется производственная отработка и разбивка профилей [1].

Системы типа «зигзаг»

Расположение S_p в виде зигзага при параллельно расположенных RL позволяет получить спектры удалений, обогащённые ближними и средними удалениями, что благоприятно при изучении верхней части осадочного чехла – до глубин 1 000 – 1 700 м. Применяются несколько модификаций зигзагообразных систем, отличающихся азимутальными характеристиками и распределением ближних удалений [1]. К таким модификациям относятся:

- одинарный зигзаг, линии возбуждения параллельны линиям приёма;
- одинарный зигзаг, линии возбуждения ортогональны линиям приёма;
- зеркальный зигзаг.

Для всех зигзагообразных систем с плотным расположением SL характерны практически одинаковые азимутальные характеристики, различия между системами проявляются при увеличении шага SL. Подобное увеличение сводит на нет преимущества, даваемые, с одной стороны, кусочно-гладкими линиями, унаследованными «зигзагом» от систем с наклонным расположением линий и, с другой стороны, более равномерным заполнением пространства пунктами возбуждения, характерным для систем типа «кирпич». Технологически использование зигзага

обеспечивает в 2 раз меньшие переезды для источников в случае невзрывного возбуждения колебаний по сравнению с аналогичными ортогональными системами. Оптимально использование систем типа «зеркальный зигзаг» в слабозалесённых и пустынных районах [1].

Системы с псевдослучайным расположением S_p и/или R_p

Системы с псевдослучайным расположением пунктов возбуждения и/или пунктов приема применяются преимущественно в районах с сильно развитой инфраструктурой, где нет возможности регулярного расположения линий. При этом создаются отклонения от линейного положения как для приёмных профилей, так и для профилей возбуждения.

Одним из преимуществ данных систем являются сглаженные спектры азимутов и удалений (уменьшенное влияние системы наблюдений на результаты обработки данных). При проектировании работ существует тенденция к созданию наиболее равномерных распределений азимутов и удалений по площади работ. Это достигается путём относительно неравномерной расстановки R_p и S_p , при сохранении условия выполняемости работ. Иногда внесение элемента случайности сопровождается перемещением S_p или R_p по какой-то определенной схеме. Иногда из-за поверхностных препятствий будет необходимо перемещать R_p и/или S_p , таким образом, выполняя желаемую цель [1].

Таким образом, основным преимуществом внесения элемента случайности является более ровное распределение удалений и азимутов. Основной недостаток таких систем заключается в неравномерности распределения кратности. Такая прерывность в кратности может привести к искажениям в процессе обработки.

Системы типа «кнопка»

Линии приёма располагаются параллельно линиям взрыва в шахматном порядке, при этом линии приёма следуют друг за другом с шагом, равным шагу R_p , а их сплошность нарушается в соответствии с характеристиками съёмки. При этом интервал разрыва сплошности равен интервалу расположения пикетов по обе стороны от разрыва [1].

Системы типа «кнопка» обеспечивают детальное изображение участков недр по большинству азимутов, однако характер системы приводит к появлению сильной неравномерности по удалениям. В целом, система может применяться в пустынных районах для неглубокого залегающих целевых горизонтов при их сложном строении и необходимости освещения с разных азимутов [1].

Круговые системы

В данной системе приёмные и взрывные линии расположены по окружности или ряду концентрических окружностей. Данные системы являются идеалом для 3D-съёмок, т. к. в них представлены все азимуты и большинство удалений, однако расположение пикетов достаточно трудоёмко [1].

Радиальные системы

Системы данного типа применяются для уточнения положения соляных куполов (если известна вершина) и для уточнения параметров вокруг скважин [1].

Обобщение информации о системах наблюдений

Достоинства и недостатки каждой системы наблюдений 3D сейсморазведки представлены в виде итоговой таблицы (таблица 2).

Таблица 2

Достоинства и недостатки стандартных систем наблюдений

Система наблюдений	Достоинства	Недостатки
Ортогональная	Простая геометрия. Невысокая стоимость. Хорошее распределение удалений по всем направлениям в целом. Минимальное перемещение оборудования	Наличие ярко выраженных минимумов в азимутальном спектре и пустых секторов при азимутальном анализе
Система с наклонным расположением линий возбуждения	Простая геометрия. Непрерывное проложение взрывных линий. Расширенный спектр азимутов по сравнению с крестовыми системами	Увеличенное значение l_{\min} , неоптимальное для прослеживания верхних целевых горизонтов
«Кирпич»	Небольшие значения l_{\min} позволяют проследить верхние горизонты.	SL прерывно распределены в пространстве, что приводит к усложнению

	Существует возможность увеличения шага RL. Приемлемые спектры азимутов и удалений	топографогеодизических работ
«Кнопка»	Эффективное использование систем с большим количеством каналов. Хорошие спектры азимутов и удалений	Требование большого количества SP на широкой территории. Увеличенное число каналов. Необходимость проложения частых RL
Зигзаг	Небольшие значения l _{min} позволяют проследить верхние горизонты. Существует возможность увеличения шага RL. Обогащённые в среднем диапазоне спектры удалений	Сложность топографо-геодезических работ. Сложность отработки площади для оператора. Необходимость проложения частых SL
Радиальная	Возможность получить полную картину отражений от соляного купола и аналогичных структур	Нетехнологичность отработки
Круговая	Идеальные спектры азимутов и удалений	Сложность проектирования и практической реализации. Неустойчивость к техногенным помехам

1.2. Методика расчета систем наблюдений

Ортогональная система 3D наблюдений

При данной системе наблюдений район работ прямоугольный; система наблюдений ортогональна (линии отстрела (SL) и линии приема (RL) взаимно-ортогональны)

Начальные данные:

Имеем основные геолого-геофизические и экономические факторы:

- Контур района работ (координаты сторон [м]: x_1, x_2, y_1, y_2),
- $(h_{\min} \div h_{\max})$ [м] – интервал глубин целевых горизонтов,
- $TS_{x,y}$ [м] – минимальный целевой размер по осям X, Y; dh_{\min} [м] – минимальный целевой размер по вертикали,
- F_m [крат] – средняя полная кратность,
- F [крат] – минимальная полная кратность,
- TC [\$] – максимальная стоимость работ.
- N_c [канал] – канальность станции, n_c [канал] – число активных каналов в расстановке (patch).

Система координат: оси X и Y параллельны сторонам прямоугольника, ограничивающего начальный район работ, т.е. район, в пределах которого требуется информация о геометрии целевых горизонтов, лежащих в интервале глубин $h_{\min} \div h_{\max}$ (рис. 5). Ось Y направлена на север, ось X – на восток.

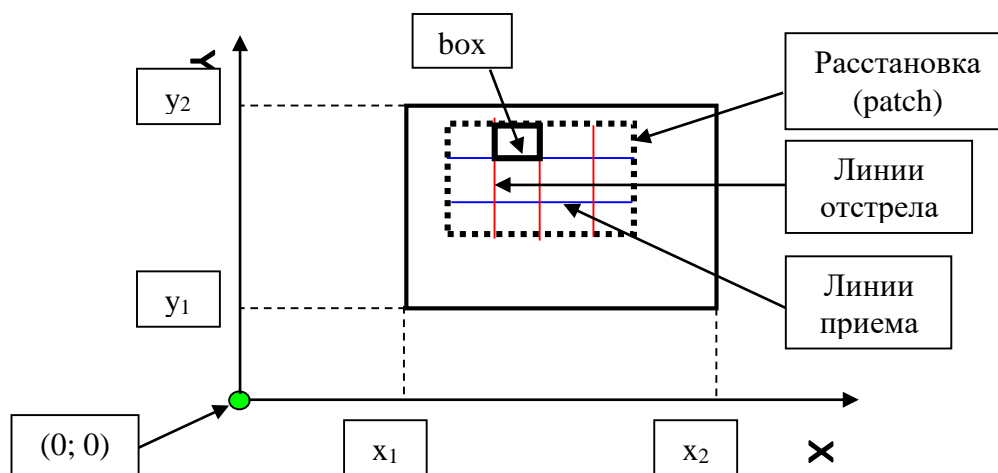


Рисунок 5 Начальный район работ (ортогональная система) [6].

Проектирование принимающей расстановки (patch):

Обычно линии приема и ось X располагают вдоль длинной стороны участка работ, то есть индексы $x \equiv r$, $y \equiv s$. При принятой ортогональной системе наблюдений имеем: $\mathbf{B}_r = \mathbf{B}_x$ – длина бина в направлении линии приема [м], $\mathbf{B}_s = \mathbf{B}_y$ – длина бина в направлении линии отстрела [м].

1) Находим размер бина по осям X , Y [м]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{B}_{x,y} = b_1 * TS_{x,y} \quad (2.6.1) \\ \mathbf{B}_{x,y} = V_{int} / (b_2 * f_{max} * \sin(\theta_{x,y,max})) \quad (2.6.2) \\ \mathbf{B}_{x,y} = V_{int} / (b_3 * f_{dom}), \quad (2.6.3) \end{array} \right.$$

где V_{int} – минимальная интервальная скорость (в интервале $0 \div h_{max}$) [м/с]; f_{max} – ожидаемая максимальная частота регистрируемой волны [Гц]; $\theta_{x,y,max}$ – максимальные углы падения целевых горизонтов ($0 - 90^\circ$), отсчитываемые от горизонтали до целевого горизонта в направлениях X и Y , без учета направления падения; f_{dom} [Гц] – преобладающая частота трассы (определяется непосредственно по пробным сейсмограммам).

По вычислениям выбираем минимальный $\mathbf{B}_{x,y}$.

Бин (“наземный”) представляет собой площадку на поверхности наблюдений. Все трассы, имеющие СТ в пределах этой площадки, после ввода поправок, суммируются в одну суммотрассу, привязываемую к центру бина. Формально, размер, форма и расположение бинов не зависят от целей съемки, типа системы наблюдений, ее параметров и т.д., - они могут быть выбраны произвольно. Но следует иметь в виду, что увеличение площади бина приводящее к пропорциональному росту кратности, т.е. надежности выделения полезного сигнала, уменьшает горизонтальную детальность съемки, т.к. одна суммотрасса будет приходиться на бóльшую площадь (также падает вертикальная разрешенность разреза – тем больше, чем более наклонны горизонты). Реально, отношение сигнал/шум прямо пропорционально квадратному корню из площади бина. На практике, сеть бинов рассчитывают, исходя из целей съемки и имеющихся аппаратурно-методических средств.

Уравнение $\boxed{\mathbf{B}_{x,y} = b_1 * TS_{x,y}}$ выражает условие: аномалии целевого размера должны быть “подсечены”, как минимум, 2 – 3-мя суммотрассами, т.е., соответственно, $b_1 = 0.5 \div 0.3$.

Уравнение $B_{x,y} = V_{int} / (b_2 * f_{max} * \sin(\theta_{x,y_{max}}))$ выражает условие: в пределах “наземного” бина фаза одного фронта самой короткой отраженной волны должна измениться не более, чем на $\frac{1}{2}$ периода, т.е. $b_2 > 2$, реально $b_2 = 2 \div 4$. Подчеркнем, что $\theta_{x,y_{max}} \neq 0$, в противном случае имеет место плоско-параллельная модель среды и проектирование ортогональной системы теряет смысл. Для исследования глубин залегания горизонтов в этом случае достаточно одного продольного профиля 2D.

Уравнение $B_{x,y} = V_{int} / (b_3 * f_{dom})$ выражает условие: горизонтальное разрешение должно быть в пределах от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{2}$ преобладающей длины волны, т.е., соответственно, $b_3 = 4 \div 2$.

2) Определяем интервалы приема [м]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_i = 2 * B_x, (2.7.1) \\ S_i = 2 * B_y, (2.7.2) \end{array} \right.$$

При принятой ортогональной системе интервал группирования средних точек (СТ) офсетов по оси X будет равен половине интервала приема. Интервал группирования СТ по оси Y будет равен половине интервала отстрела.

3) Определяем плотность отстрела [точка/км²]:

$$n_s = F_m * 10^6 / (n_c * B_x * B_y), (2.8)$$

где $n_c = n * N_c$, ($0 < n \leq 1$). Коэффициент n определяется конкретной методикой расстановки, сбора линий приема; числом резервных, вспомогательных и ремонтируемых каналов.

Для достижения заданной кратности F_m в заданном бине $B_x * B_y$ по расстановке из n_c активных каналов необходима плотность отстрела n_s не менее вычисленной по (2.8).

4) Определяем расстояние между линиями отстрела [м]:

$$S_{li} = 10^6 / (2 * B_y * n_s), (2.9)$$

Полученное значение S_{li} определяет то наибольшее расстояние между линиями отстрела (SL), которое при заданной канальности станции обеспечивает требуемую кратность наблюдений.

5) Определяем расстояние между линиями приема [м]:

$$R_{li} = (x_{min}^2 - S_{li}^2)^{1/2}, (2.10)$$

где x_{\min} [м] – наибольший из офсетов, $\text{box}'a$, т.е. его диагональ. Box – это прямоугольник, образованный двумя соседними RL и SL, рис. 6. x_{\min} принимается: $x_{\min} = i * h_{\min}$, $i = 1.0 \div 1.2$.

При офсете $x = (1.0 \div 1.2) * h$ волна падает на целевой горизонт, имеющий глубину h под углом $\psi \approx 26 - 30^\circ$, что обеспечивает докритический запас в $5 - 10^\circ$ для геологических обстановок большинства осадочных бассейнов. Условие x_{\min} равен диагонали $\text{box}'a$ необходимо для прослеживания целевого горизонта, имеющего глубину h_{\min} докритическими отражениями. Таким образом, полученное значение **Rli** определяет то наибольшее расстояние между линиями приема (RL), которое еще обеспечивает непрерывную прослеживаемость целевого горизонта, имеющего глубину h_{\min} докритическими отражениями.

Выражение (2.10) при $h_{\min} < Sli / i$ теряет смысл, т.е. при начальных условиях бессмысленно требовать прослеживание горизонтов с глубинами $h < Sli / i$ докритическими отражениями и вводить эти h в качестве h_{\min} в п. 1.1. Из (2.8, 2.9) следует, что выражение $h < Sli / i$ эквивалентно выражению $h < n_c * V_x / (2 * F_m * i)$. Величина V_x , вычисляемая по (2.6.1–2.6.3) задает горизонтальное разрешение; величина F_m обуславливает качество выделения полезного сигнала (отражения), значит, V_x и F_m не могут быть произвольно изменены. Следовательно, чтобы уменьшить h_{\min} необходимо уменьшить n_c , согласно (2.8) увеличивая n_s и по (2.9) уменьшая Sli .

- б) Интервал линий отстрела (Sli) [м] и интервал отстрела (Si) [м] связаны между собой соотношением:

$$Sli * Si = 10^6 / n_s, (2.11)$$

При таком соотношении Sli и Si обеспечивается вычисленная по (2.8) плотность отстрела n_s .

Примем следующее расположение RL и SL в template, рис.6. Template есть совокупность расстановки (patch) и всех точек отстрела, из которых отстреливается эта расстановка.

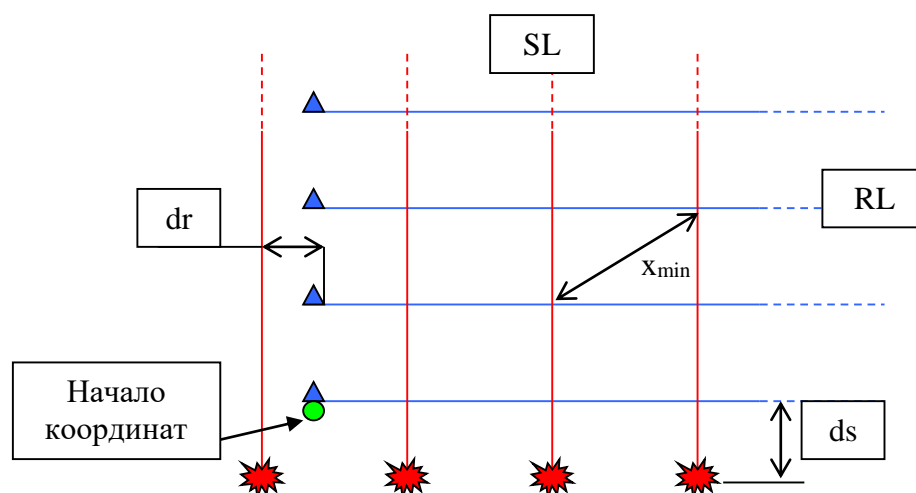


Рисунок 6 Взаимное расположение RL и SL в template [6].

Здесь $dr \geq 0$ – вынос крайней SL за концы RL's, $ds \geq 0$ – выносы SL's за крайнюю RL; dr , ds – это минимальные расстояния, которые обеспечивают безопасный проход носителя-источника вдоль крайних приемников. Величины dr и ds задаются проектировщиком. Обычно dr , $ds = (10 - 50)$ м.; Расставляются все имеющиеся приемники (Rp), а отстрел осуществляется последовательно от точки к точке (Sp).

Длина и количество линий приема зависят от величины x_{max} и канальности n_c . При этом x_{max} определяется аналогично x_{min} : $x_{max} = a * h_{max}$, где h_{max} [м] – глубина самого глубокого целевого горизонта, $a = (1.0 \div 1.2)$, рис. 7.

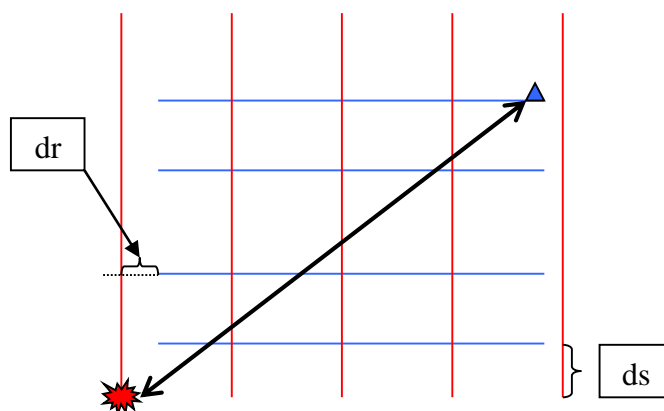


Рисунок 7 Максимальный офсет отдельной расстановки (patch) [6].

Составим систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{max}^2 \geq ((N_{rl} - 1) * R_{li} + ds)^2 + (R_{ll} + dr)^2 \quad (2.11.1) \\ n_c = R_{ll} * N_{rl} / R_i \quad (2.11.2) \end{array} \right.$$

Неравенство (2.11.1) определяет размер template: нецелесообразна работа на офсетах, больших x_{\max} , т.к. соответствующие трассы будут содержать только закритические отражения, выделение которых будет затруднено наличием опережающих головных волн. Уравнение (1.10.2) выражает ограничение числа и длины RL по числу каналов n_c . При расчетах принимается равенство количества точек (приема или отстрела) и количества интервалов между ними, - что допустимо при малых R_i , S_i и большом количестве точек. Расчетные формулы при этом значительно упрощаются.

Из (2.11.1, 2.11.2) следует:

$$f(R_{ll}) = R_{ll}^4 + m_3 * R_{ll}^3 + m_2 * R_{ll}^2 + m_1 * R_{ll} + m_0 \leq 0, \quad (2.11.3)$$

где $f(R_{ll}) = ((N_{rl} - 1) * R_{li} + ds)^2 + (R_{ll} + dr)^2 - x_{\max}^2$,

$$\begin{cases} m_3 = 2 * dr, \\ m_2 = (R_{li} - ds)^2 + dr^2 - x_{\max}^2, \\ m_1 = 2 * n_c * R_i * R_{li} * (ds - R_{li}), \\ m_0 = (n_c * R_i * R_{li})^2. \end{cases}$$

Решая (2.11.3), находим область изменения R_{ll} .

7) Определяем длину записи [c]:

$$tw = 2 * h_{\max} / (V_{int} * \cos(\arctg(a / 2))), \quad (2.12)$$

Чтобы отражение от самого глубокого целевого горизонта присутствовало даже на трассе с максимальным офсетом, длина записи должна быть не менее вычисленной по (2.12).

В итоге, определяем следующие параметры расстановки и съемки в целом:

- $B_{x,y}$ – размеры бина по осям X, Y,
- S_i – интервал отстрела,
- R_i – интервал приема,
- n_s – плотность отстрела,
- S_{li} – интервал линий отстрела,
- R_{li} – интервал линий приема,
- R_{ll} – длина линий приема,
- N_{rl} – число линий приема,

- ds , – вынос линий отстрела за крайнюю линию приема,
- dr – вынос крайней линии отстрела за концы линий приема,
- Sll , – длина линий отстрела,
- Nsl – число линий отстрела.
- Nrp – число точек приема на линию приема,
- Nsp,p – число точек отстрела на линию отстрела,
- t_w – длина записи.

1.3. Общие сведения об объекте работ

Нижнетуломское водохранилище — искусственный водоём на севере Мурманской области. Участок р. Тулома от пос. Мурмаши до 28-го км автодороги Кола. Водохранилище образовано плотиной Нижнетуломской ГЭС в 1934—1936 годах.

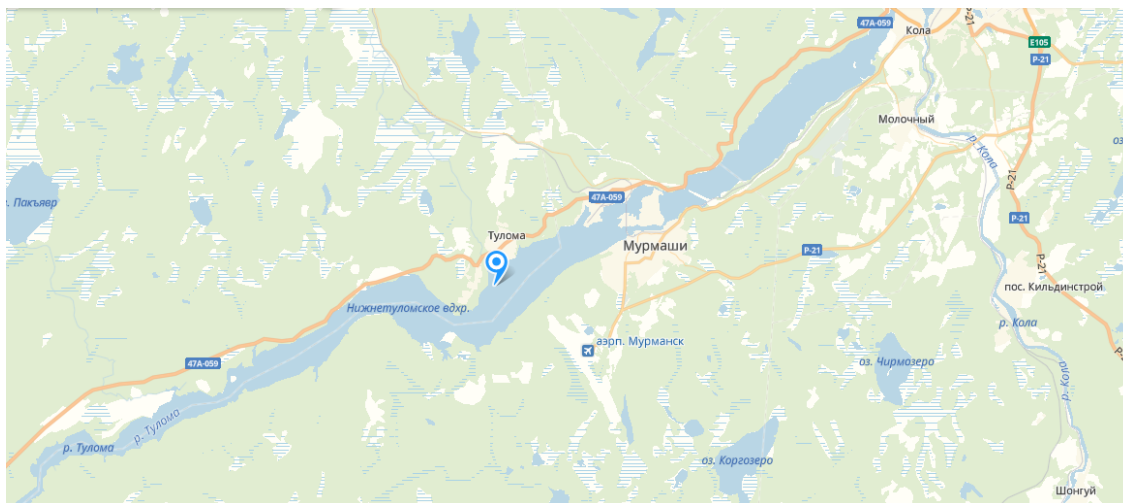


Рисунок 8 Географическое положение Нижнетуломского водохранилища на карте Мурманской области

Геолого-геоморфологическая характеристика

Кольский полуостров располагается на Балтийском щите - одном из устойчивых, малоподвижных геологических структур. Он образовался в процессе длительной эволюции земной коры, которая в начале палеозойской эры (около 550 млн. лет назад) оформилась в прочный кристаллический массив. В последующем тектонические процессы привели к появлению трещин и разломов, разбивших щит на ряд крупных блоков. Такое блоковое строение сохраняется и в настоящее время. Щит сложен в основном древнейшими метаморфизованными и изверженными породами (гнейсы, сланцы протерозойского возраста, амфиболиты, интрузии гранитов, диоритов, габбро и диабазов - они образуют сложную складчатую структуру, вытянутую в направлении с северо-запада на юго-восток). Эти складчатые сооружения разбиты в разных направлениях многочисленными разломами, уходящими на большую глубину [7].

К началу четвертичного периода современный рельеф был в основном сформирован. Последующие геологические события лишь видоизменяли его в той или иной степени [7].

Территория характеризуется преобладанием холмисто-грядового моренного рельефа, представляющего собой беспорядочное сочетание холмов и гряд, высотой до 420 м, разделенных холмистыми равнинами и глубокими врезами речных долин (абсолютные отметки здесь, как правило около 20 метров). На участках активного движения ледника образовались друмлины. Озерно-ледниковые формы рельефа - камы и озы - возникли в период отложения песчаных осадков в стоячей воде замкнутых ледниковых озер. На поверхности большей части понижений, преимущественно вблизи озёрных котловин, расположены болота, иногда достигающие больших размеров [7].

На рассматриваемой территории выделяют шесть последовательно образовавшихся комплексов горных пород. Самый древний архейский комплекс представлен гранитоидами и гранито-гнейсами. Выходы архейских пород имеются практически по всей территории полуострова. К раннепротерозойскому и среднепротерозойскому комплексам относятся гнейсы и кристаллические сланцы, которые первоначально представляли собой осадочные породы и вулканические лавы. Верхнепротерозойский комплекс представлен в основном осадочными породами. Это преимущественно песчаники, глинистые сланцы, доломиты и алевролиты. В состав пород палеозойского комплекса входят главным образом изверженные породы. Кристаллические образования составляют нижний структурный ярус, перекрытый рыхлыми четвертичными образованиями верхнего яруса – ледниковыми, морскими, озерно-ледниковыми, флювиогляциальными, торфяно-болотными и элювиально-делювиальными отложениями, представляющими собой отложения рыхлых осадков, песков, глин и галечников. Мощность рыхлого покрова, как правило, не превышает десяти метров, но в понижениях рельефа, речных, озёрных и предгорных долинах может достигать десятков и сотен метров [7].

В нижней части разреза четвертичных отложений развит горизонт флювиогляциальных отложений (f.lgQшpd). В долине р.Туломы горизонт залегает узкой полосой (500-600 м) вдоль русла водохранилища (~150 м в переуглубленной части) на глубине 30-80 м. Мощность достигает 40 м. Представлен валунно-галечниковыми отложениями [3].

Залегающий выше ошашковский морской горизонт (mQшos) в долине р.Туломы – литологический состав изменяется от тонких песчаных фракций (в верхней части разреза) до валунно-галечных отложений – в нижней. Мощность горизонта до 60-70 м. [3].

В системе четвертичных отложений долин р. Туломы, в верхней ее зоне, выделяются горизонты, к которым (по преимущественному распространению)

относятся: современный торфяно-болотный горизонт (vQ_{IV}) – в виде разобщенных участков, мощностью 0,5-1,5 м, и современный морской горизонт (mQ_{IV}), мощностью от 5 до 25 м. [3].

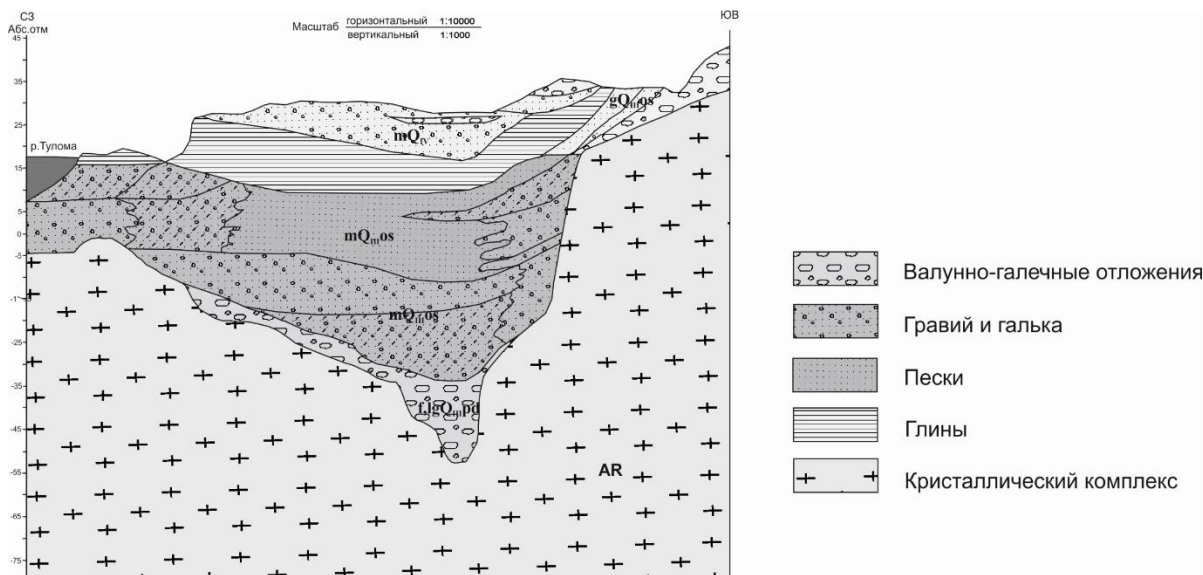


Рисунок 9 Геологический разрез вблизи участка работ [3]

Физико-географические условия в районе проведения работ

На качество работы оказывали влияние следующие физико-географические условия:

- Рельеф дна. В месте мостового перехода ширина реки составляет 880м. Русло реки по оси мостового перехода имеет сложный рельеф и осложнено рядом банок и отмелей естественного происхождения. Наиболее крупная отмель расположена в 80-100м от правого берега и имеет протяженность порядка 350-400м. Во время отлива поверхность отмели возвышается над урезом воды на 0,2-0,6м в течение 3-4 часов; в этот период максимальные глубины у правого берега около 4м, у левого берега около 8м. Полный размах уровня воды (прилив/отлив) около 2,5-3,2м;

- Течения. Фактическая скорость суммарного речного и приливно/отливных течений составляла до 4-х узлов. Направления приливно/отливных течений сменялись дважды в течение суток. На отмели расстановка и сбор донных модулей проводились в минимальную воду (2 раза в сутки). Отстрел проводился в максимальную воду (2 раза в сутки);

• Ветровое волнение. Ветровое волнение по высоте составляло от 0,0м. до 0,2м. и характеризовалось коротким периодом волны и частой сменой направления.

Наиболее значимыми факторами для скорости выполнения работ являлись: приливно-отливные течения (их влияние ограничивало время регистрации до 6 ч/сут), техногенные факторы (работы по сооружению опоры моста на западном берегу, проходящие поезда) [4].

Методические и технологические особенности работ

Условия возбуждения упругих колебаний имели следующие особенности:

1. Возбуждение сейсмических колебаний проводилось с помощью порохового источника упругих колебаний «Пика-12К». Возбуждение колебаний происходило за счет выстрела стандартного дробового патрона 12 калибра (дробь номер/масса, $g = 5/32$; порох G3000, масса 1.6г) в водном слое на глубине до 1м
2. Объект обрабатывался с заглублением источника 1м;
3. На суше возбуждение не проводилось;
4. Относительно тонкий слой воды на отмелях обуславливал интенсивную реверберацию в ближней и средней зонах.

Условия прохождения упругих колебаний имели следующие особенности:

1. Повсеместно на площади работ имели место очаговые неоднородности ВЧР (булыжники, обломки коренных пород, осадки разной степени обводненности), обуславливавшие сложную картину осей корреляции отражений;
2. Берега реки образованы крутопогружающимися скальными породами (гранито-гнейсы). Поэтому отстрелы с крайних линий отягощены волнами-спутниками (отражения от бортов русла).

Условия приема упругих колебаний имели следующие особенности:

1. Наиболее информативная зона МОВ (ближне-средняя), была «засорена» реверберацией; применение полосовой фильтрации представляла собой поле хаотически расположенных пиков целевых частот. Полноценное выявление целевых осей синфазности в ближне-средней зоне возможно только при окончательной обработке данных после тестирования и применения оптимальной деконволюции с настройкой параметров на конкретные характеристики реверберации и сигнатуру сигнала возбуждения;

2. По экспресс-оценке наиболее информативными являются записи геофонов х, у и z. (Вероятно, малая глубина реки препятствовала реализации полной амплитуды давления отраженного сигнала, принимаемого гидрофоном (h));

3. Приливно-отливные течения, прохождения поездов по правому берегу на траверзе объекта и горные работы на левом берегу обуславливали высокие донные шумы;

Условия регистрации сейсмической информации имели следующие особенности:

1. Регистрация осуществлялась донными сейсмическими модулями Turtle-500, работающими в непрерывном режиме. Т.к. модули Turtle-500 автономные, то количество и качество зарегистрированной информации становилось известным только после подъема модулей, их остановки и снятия данных. При отработке профиля часы модулей Turtle-500 синхронизировались дважды: перед началом цикла отработки и после его окончания. Временная невязка (время ДМ-время UTC) в этом интервале вводилась в трассы линейно по времени;

2. Первичная сортировка сейсмических данных – общая станция (ОС): сейсмограмма включает трассы отстрелов, записанные донным модулем (ДМ) Turtle-500. Т.к. ДМ на протяжении всего отстрела не меняли своих пикетов, то эта сортировка также и ОПП. Офсет трасс (проектный/фактический), не более (960м/960м).

Технология сбора данных имела следующие особенности:

1. Была реализована МОГТ 3D/4(3)С крестовая система наблюдений;

2. Весь объект был отработан одной расстановкой, т.е. отстрел проводился на неподвижную расстановку.

Условия экспресс-обработки сейсмической информации имели следующие особенности:

1. Экспресс-обработка сейсмической информации проводилась пакетами OMNI, VISTA;

2. Проводилась повальная визуальная оценка первичного сейсмического материала;

3. После препроцессинга записи компоненты z обрабатывались по полювому графу, включая получение суммарного экспресс-куба (временного, немигрированного);

4. Материал, предназначенный для дальнейшей финишной обработки, проходил препроцессинг, архивировался WinRAR без пароля и записывался на CD(DVD). Этот материал представляет собой базу сейсмических данных (h,x,y,z) с введенной постановочной геометрией – из данных оригинальных флеш-карт были оставлены только файлы рабочих отстрелов (по данным прибора отметки момента ОМ). Сейсмограммы по амплитудам и времени не редактировались. Базы данных – в сортировке ОПП, схема – истинная (т.е. не обращенная) [4].

Сейсморазведочная аппаратура

Регистрация осуществлялась мобильным сейсмическим комплексом «Turtle-500» на основе автономных донных 4С модулей сбора сейсмических данных (производства ООО «Сейсмо-Шельф», г. Санкт-Петербург, Россия).

Модуль предназначен для записи 4С-сейсмических данных на акваториях с глубинами до 500м, при проведении различных сейсморазведочных работ с донной регистрацией на акваториях всех типов, а также на прилегающей суше и для сейсмического мониторинга.



Рисунок 10 Модуль Turtle-500 в снаряженном виде [4]

Активная приемная расстановка представляла собой совокупность модулей, находящихся на расчётных линиях приема.

Модули работали в непрерывном режиме регистрации с отложенным после инициализации стартом (на предполагаемое время постановки модулей).

Таблица 3

Основные технические параметры морской
донной автономной 4С-сейсмической станции (Turtle-500) – ДМ [4]

Параметр	Величина параметра
количество регистрируемых компонент	4 (Н,Х,У,Z)
в том числе:	
– с геофонами	3
– с гидрофоном	1
глубина погружения, до, м	500
способ подъема со дна	фалом
наклонная дальность гидроакустического канала, м	800
масса ДМ (на воздухе/в воде), не более, кг	16/9
регистрируемые углы ориентации ортогональной тройки геофонов	крен, дифферент, азимут
диапазон частот с геофонами, Гц	10 – 250
диапазон частот с гидрофоном, Гц	2 – 1600
шаг дискретизации данных, мс	4; 2; 1; 0,5; 0,25
разрядность АЦП (преобразование типа Δ - σ)	24
эффективный уровень шумов (в зависимости от коэффициента усиления), мкВ	0,15 - 1,50
Коэффициенты усиления (КУ):	
– гидрофон: (предусиление 41), далее:	1,2,4,8,16,32,64
– геофоны:	1,2,4,8,16,32,64
КУ по каждой компоненте выставляются независимо	
полный динамический диапазон, дБ	140
напряжение питания, В	9 - 16
снабжена термостатированными кварцевыми часами с относительным уходом, не более	5*10 ⁻⁹
автономность работы по питанию (в зависимости от режима работы), сутки	16 - 30
емкость накопителя данных (флэш-карта), Гб	8
расчетный срок службы, годы	6

После доставки модулей в наборный комплекс, сейсмические данные сохранялись в интервалах времени отстрелов (плюс 15-ти минутные припуски по краям интервала), нарезались из внутреннего формата в формат SEG-Y-standard (от моментов отстрела плюс заданная длина записи) и сортировались по ОПП.

Возбуждение сейсмических колебаний проводилось с помощью порохового источника упругих колебаний «Пика-12К» (производства ООО «Геодевайс») (рис.11). Возбуждение колебаний происходило за счет выстрела стандартного дробового патрона 12 калибра (дробь номер/масса, г = 5/32; порох G3000, масса 1.6г) в водном слое на глубине до 1м.



Рисунок 11 Пороховой источник упругих колебаний «Пика-12К» [4]

Регистрация момента возбуждения производилась при помощи гидрофона, установленного на пороховом источнике и приборов отметки момента (ОМ) (сдублированных). Приборами ОМ формировался текстовый файл с указанием даты и времен отстрела (UTM) с точностью до 0.5 мс.

Практическая часть

2.1. Выбор параметров по данным ОМР и анализ данных ОМР

Схема ОМР представлена на рисунке 12.

Направление линия отстрела соответствовало таковому для рабочей сети отстрела.

Расстояние, на котором линия отстрела проходила от группы модулей: 10м.

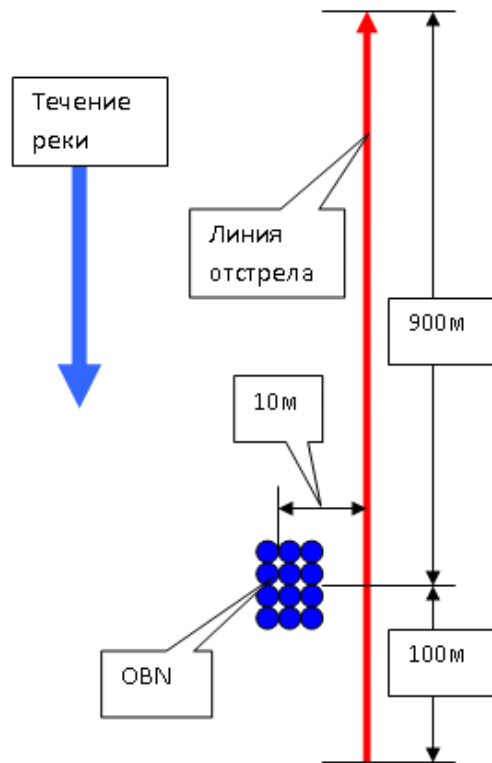


Рисунок 12 Реализованная схема приема и линии отстрела ОМР [4]

Донные модули Turtle-500 расставлялись группой в 12 шт. на глубине около 3м. В группе ДМ устанавливался возможный перечень коэффициентов усиления по каналам. Линия отстрела проходила дважды (каждый раз против течения) при двух различных заглублениях источника (0,5 и 1,0м).

Во время второго отстрела (заглубление источника 1,0м) на траверзе ДМ прошел поезд. Отстрел был прерван, источник вернули на пикет отстрела, на котором источник был 15 минут назад.

Длительность отстрела (с перерывами и циркуляциями) составила около 3 часов.

После отстрелов (по высокой воде) ДМ были оставлены на пикетах на время около 3,5 часов на предмет регистрации шума от отливного течения.

Проведение этапа ОМР должно было решить следующие задачи:

1. Выбор коэффициента усиления для АДСС (каналы: h-гидрофон и x,y,z-геофон).
2. Выбор шага дискретизации регистрации данных.
3. Выбор оптимального заглубления источника.
4. Оценка влияния техногенных шумов (проход поезда).
5. Оценка влияния шумов приливов и отливов с целью уточнения предельно допустимого интервала отстрела.

1. Выбор коэффициента усиления АДСС (каналы: h-гидрофон и x,y,z-геофон)

Перед началом проведения ОМР были предложены следующие сочетания КУ для компонент станций, таблица 4:

Таблица 4

Сочетания коэффициентов усиления [4]

№ п/п	OBS	Шаг дискретизации, мс	КУ (XYZ)	КУ (H)	Предусиление (H)
1.	17	1	8	1	41
2.	10	0,5	8	1	41
3.	19	1	16	1	41
4.	34	0,5	16	1	41
5.	21	1	16	2	41
6.	35	0,5	16	2	41
7.	24	1	32	2	41
8.	32	0,5	32	2	41
9.	28	1	32	4	41
10.	60	0,5	32	4	41
11.	29	1	64	4	41
12.	193	0,5	64	4	41

Эффект клиппирования амплитуд на ближних офсетах проявился на записи канала гидрофона при коэффициенте усиления равном 2 (рис. 13).

Эффект клиппирования амплитуд на ближних офсетах проявился на записи канала геофонов при коэффициенте усиления равном 32 (рис. 14).

Пример записи с отсутствием эффекта клиппирования амплитуд: КУ для гидрофона равен 1, КУ для геофона равен 16 (рис. 15 и рис. 16).

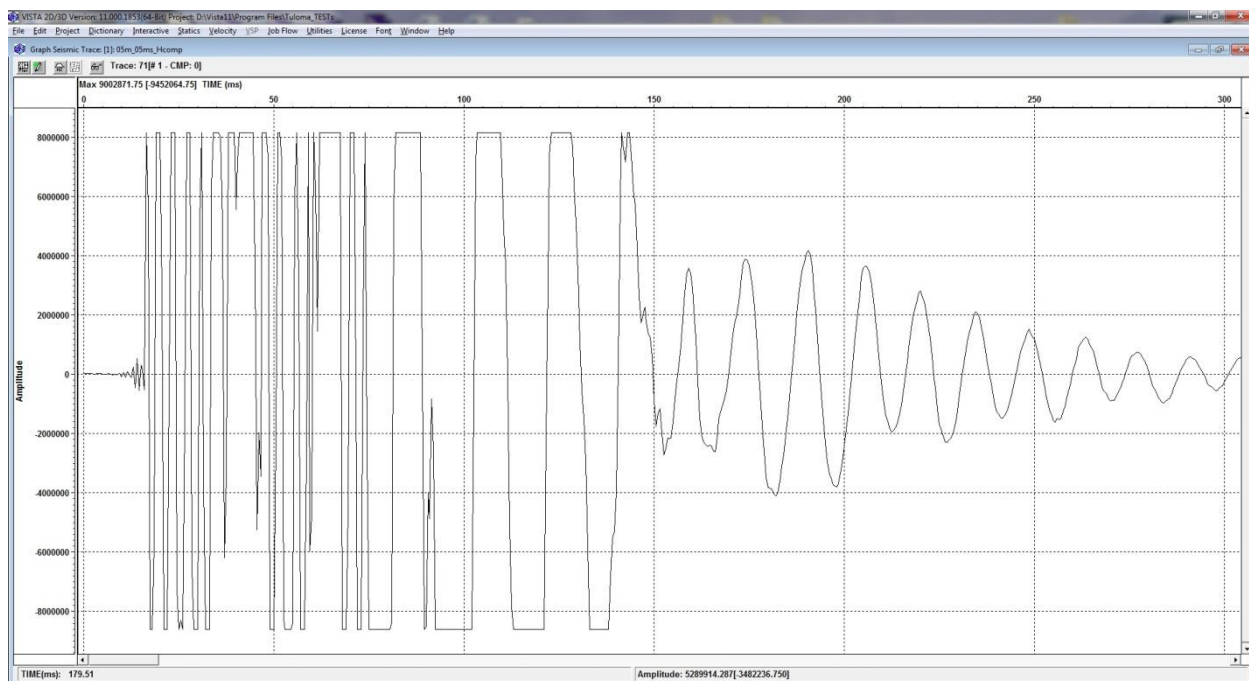


Рисунок 13 Клиппирование амплитуд. КУ=2 - гидрофон (АДСС 35).

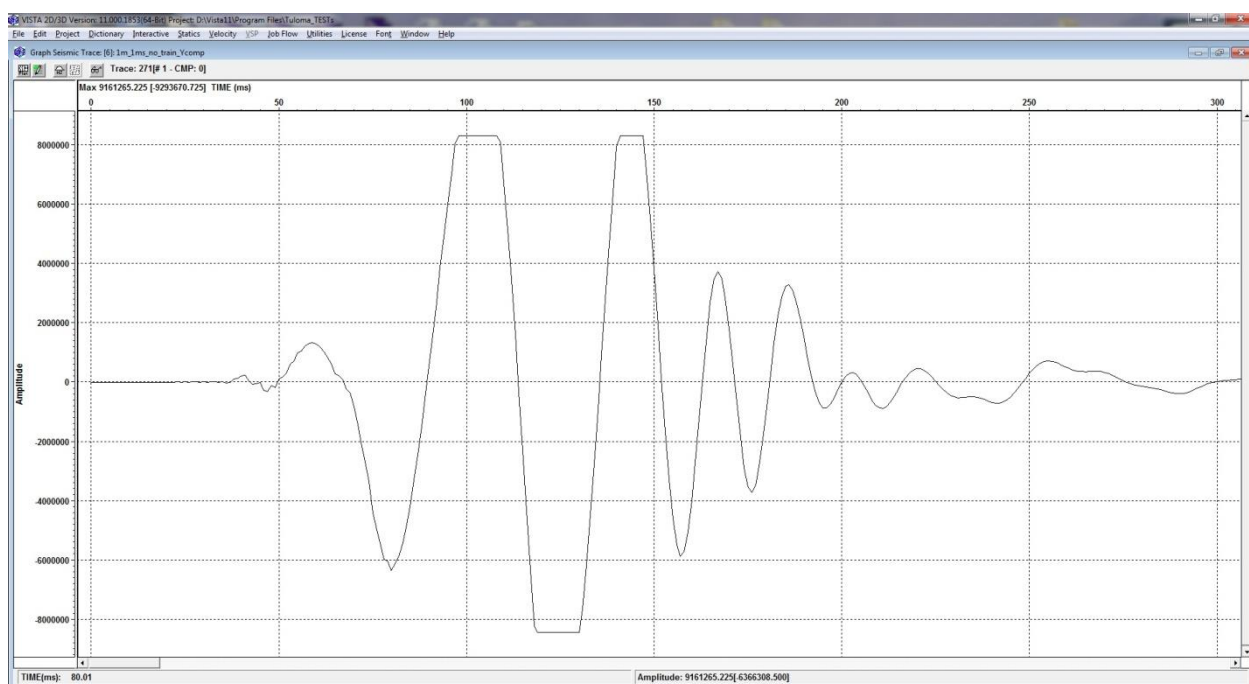


Рисунок 14 Клиппирование амплитуд. КУ=32 - геофон (АДСС 28).

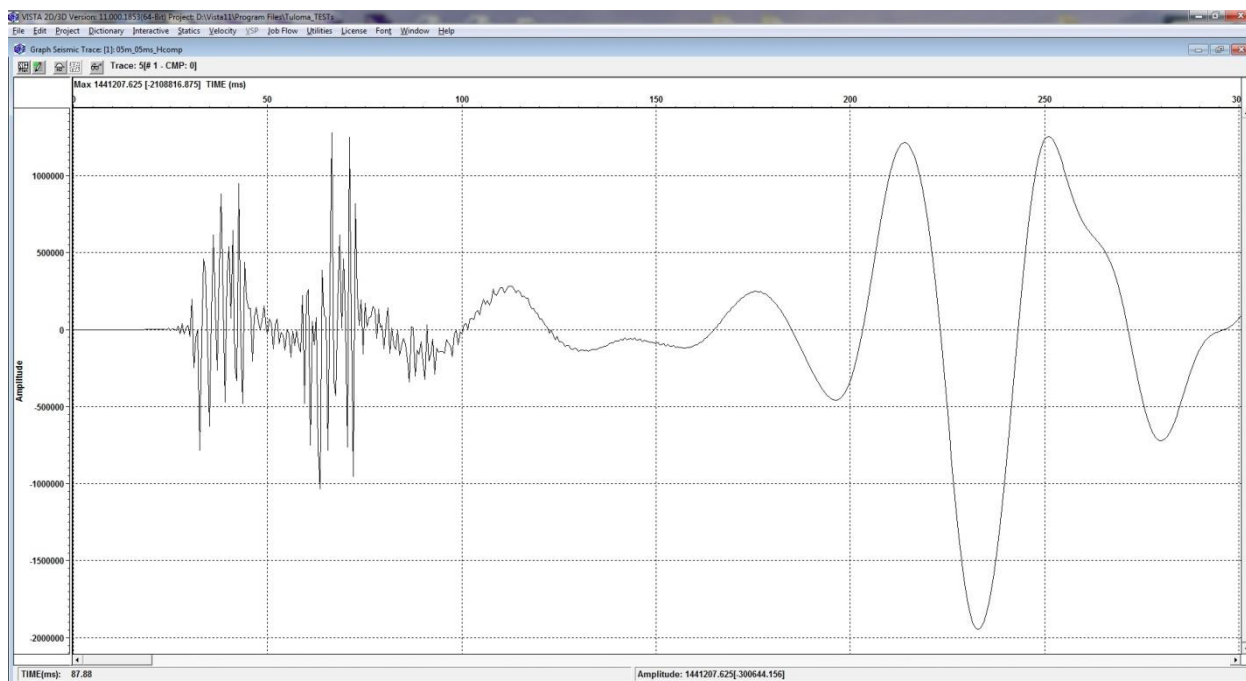


Рисунок 15 Отсутствие клиппирования амплитуд. КУ=1 - гидрофон (АДСС 10).

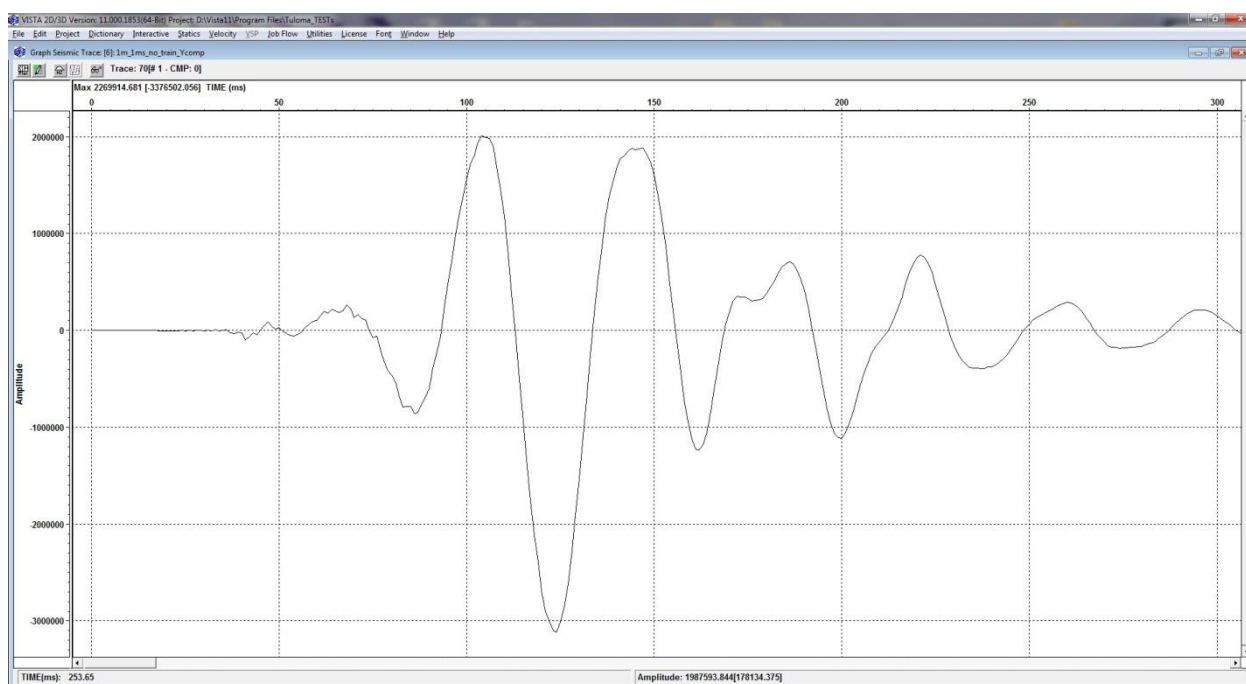


Рисунок 16 Отсутствие клиппирования амплитуд. КУ=16 - геофон (АДСС 19).

Следовательно, наиболее оптимальными коэффициентами усиления амплитуд являются 1 и 16 для каналов гидрофона и геофонов, соответственно.

2. Выбор шага дискретизации регистрации данных

Перед началом проведения работ рассматривались два варианта шага дискретизации:

- 1 мс – частота Найквиста 400 Гц (с учетом коэф. 0,8 аппаратного фильтра);
- 0,5 мс – частота Найквиста 800 Гц (с учетом коэф. 0,8 аппаратного фильтра).

В ходе проведения ОМР часть АДСС писала с шагом дискретизации 1мс, оставшаяся часть с шагом 0,5 мс (таблица 4).

Амплитудно-частотная характеристика полезного сигнала для записи с шагом дискретизации 1 мс и 0,5 мс представлены на рисунках 17 и 18, соответственно.

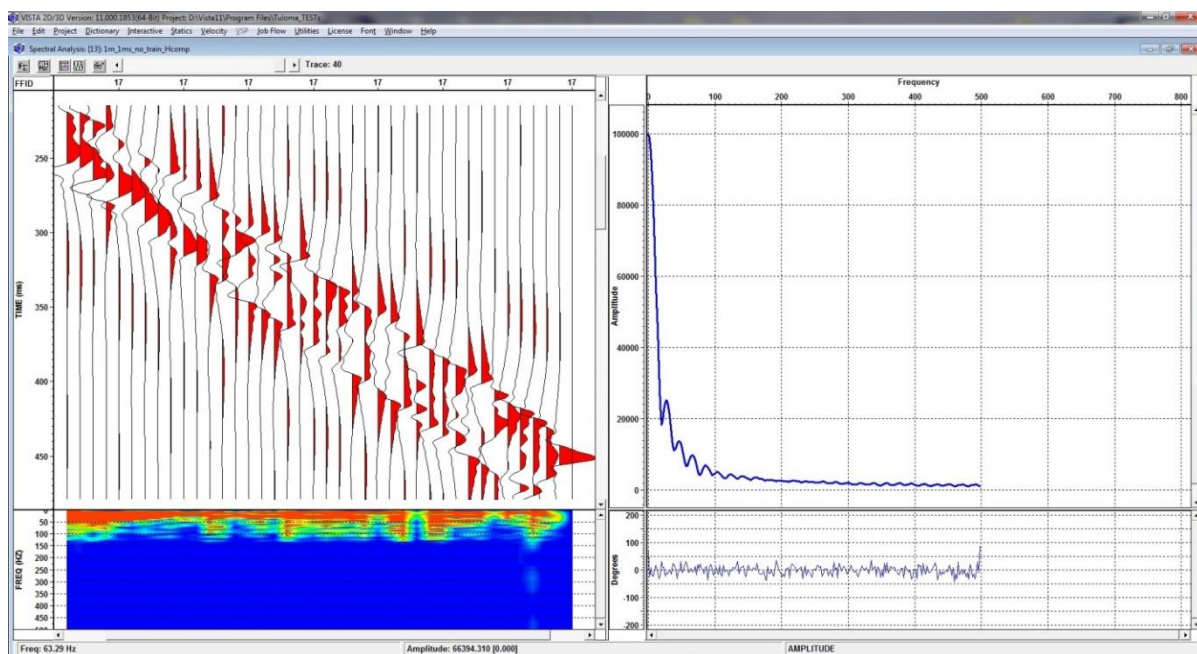


Рисунок 17 АЧХ полезного сигнала. Шаг дискретизации 1 мс.

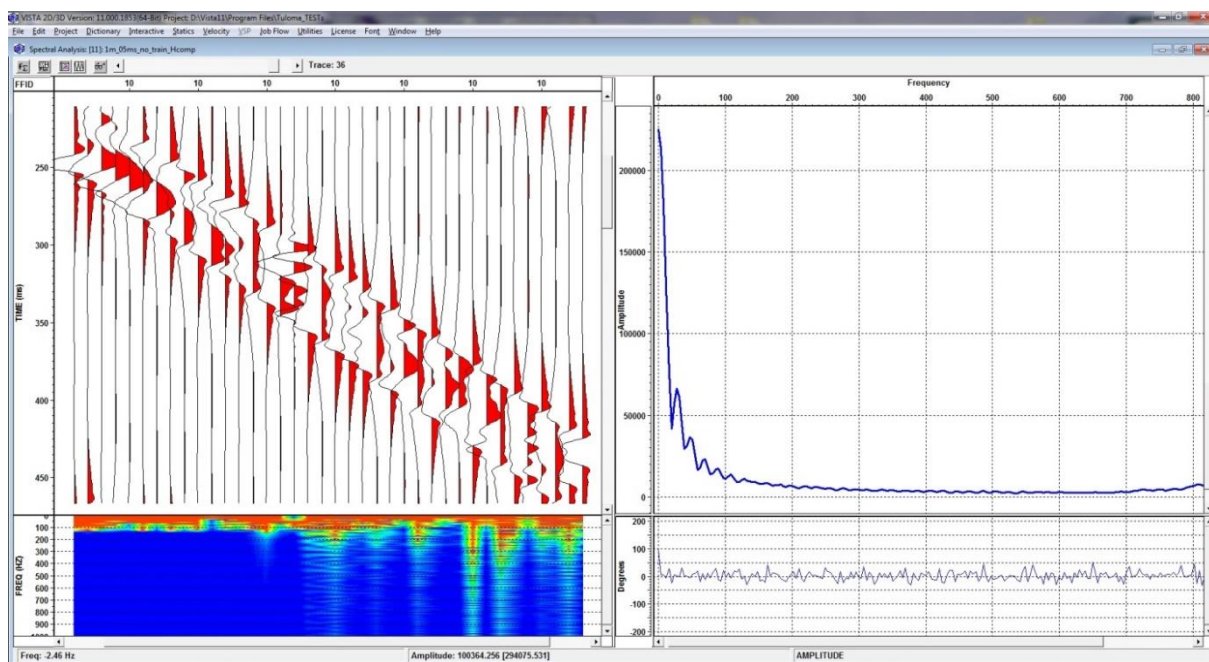


Рисунок 18 АЧХ полезного сигнала. Шаг дискретизации 0,5 мс.

Как видно из представленных выше рисунков АЧХ, полученные АДСС с разными выставленными шагами дискретизации, сходны: полезный сигнал лежит в диапазоне 5-170 Гц, и имеет пиковую частоту в районе 30-40 Гц. Отсюда следует, что шага дискретизации 1 мс (частота Найквиста 400 Гц (с учетом коэф. 0,8 аппаратного фильтра)) для записи полезного сигнала в данных геолого-геофизических условиях более чем достаточно, а шаг дискретизации равный 0,5 мс (частота Найквиста 800 Гц (с учетом коэф. 0,8 аппаратного фильтра)) является избыточным.

3. Выбор оптимального заглубления источника

В ходе проведения ОМР один и тот же профиль был отстрелян с различными заглублениями источника сейсмических колебаний (0,5 и 1 метр).

При заглублении источника на 0,5 метра преломленная волна следится на удалениях до 600-650 метров (рис. 19).

При заглублении источника на 1 метр преломленная волна при тех же геолого-геофизических условиях следится на удалениях до 730-770 метров (рис. 20).

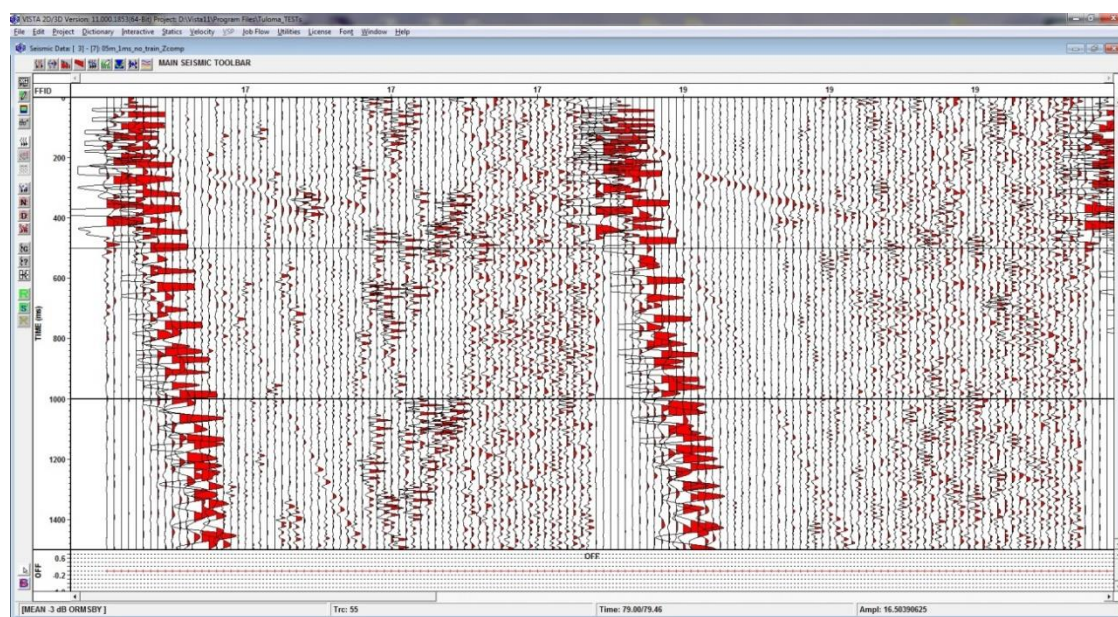


Рисунок 19 Фрагмент двух сейсмограмм ОПП, полученных при заглублении источника равном 0,5 м.

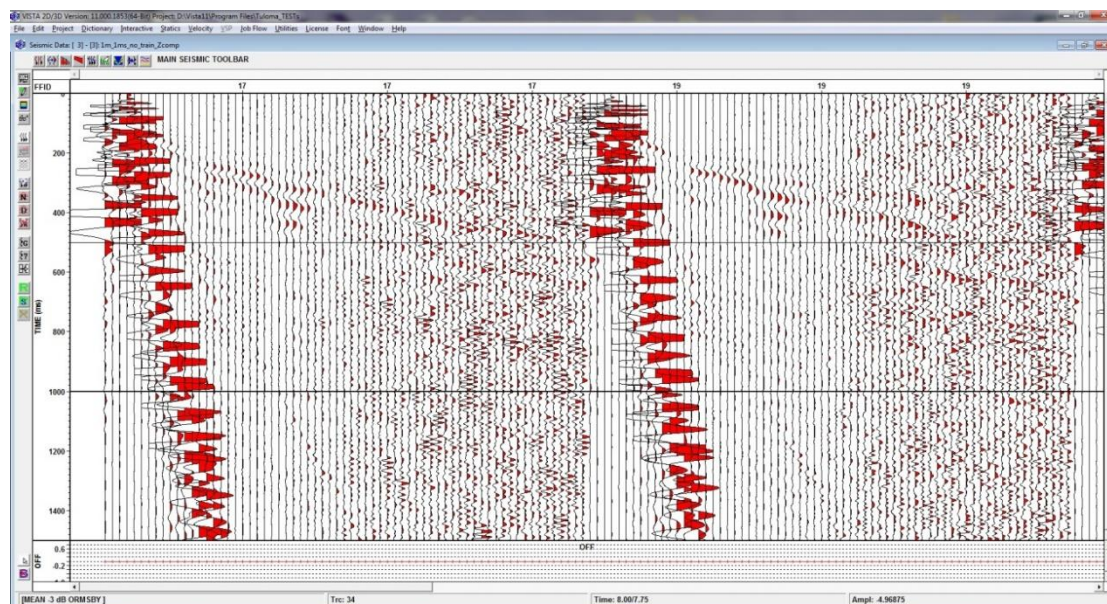


Рисунок 20 Фрагмент двух сейсмограмм ОПП, полученных при заглублении источника равном 1 м.

Проведение отстрела площади работ по большой воде позволяет заглублять источник на 1 метр, поэтому финальный выбор рабочего заглубления очевиден и составит 1 метр.

4. Оценка влияния техногенных шумов (проход поезда)

На рисунке 21 представлена часть сейсмограммы, зарегистрированная в момент прохождения поезда по железнодорожному полотну, находящемуся в 300 метрах от линии профиля. На амплитудно-частотном спектре сигнала заметно ощутимое влияние помех от проходящего поезда. Чтобы избежать влияния техногенных помех на сейсмическую запись было принято решение прерывать съемку и выполнять перестрел последних отстреленных пикетов в пределах 5 минут до и после прохождения поезда.

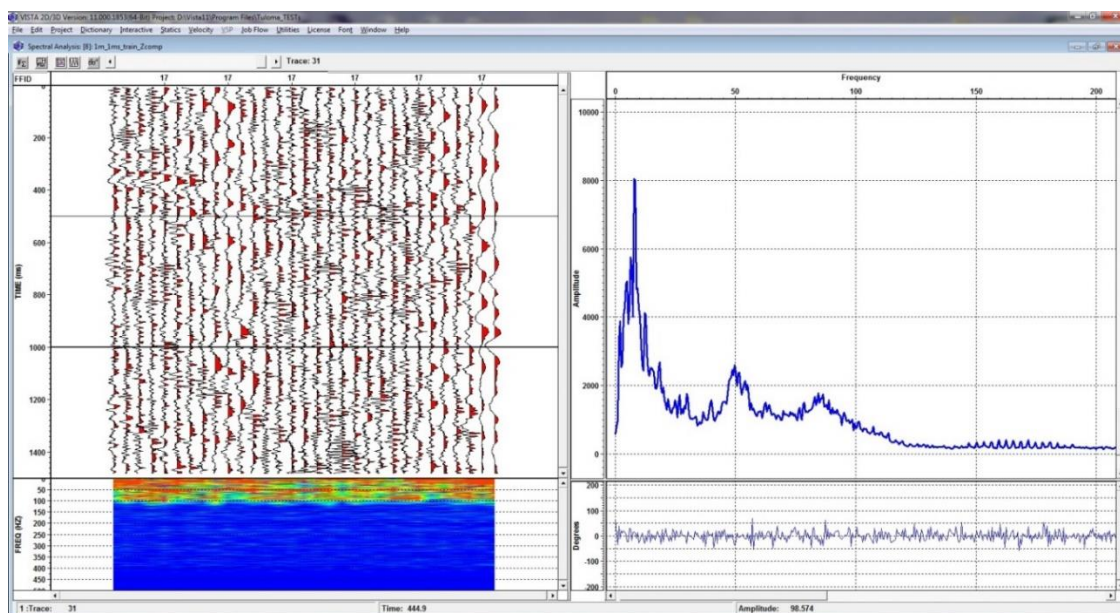


Рисунок 21 Фрагмент сейсмограммы и АЧХ сигнала, зарегистрированного в момент прохождения поезда.

5. Оценка влияния приливов и отливов с целью уточнения предельно допустимого интервала отстрела

Для оценки влияния шумов приливно-отливных течений была произведена нарезка интервалов пассивной записи АДСС. Анализ результатов данной нарезки показал, что в полную воду, а также в интервале $\pm 1,5$ часа от полной воды, шумы, создаваемые приливно-отливными течениями являются минимальными и не создают препятствий для получения качественных сейсмических данных. По мере понижения уровня воды интенсивность шумов увеличивается. Спектр помех расширяется от низких частот к высоким и шумы достигают своего максимума (как по ширине спектра, так и по своей интенсивности) ко времени начала малой воды (рис. 22).

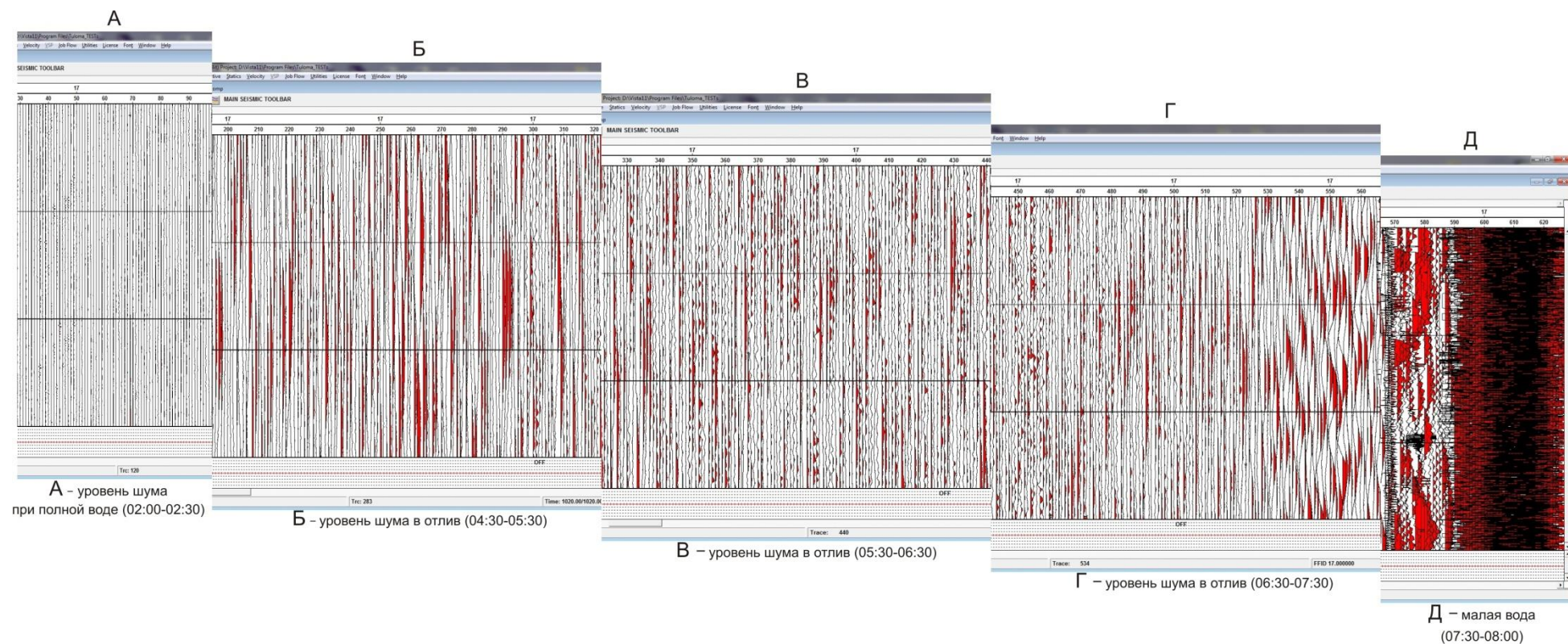


Рисунок 22 Сравнение шумов приливно-отливных течений.

Итоги проведения ОМР

Благодаря проведенным опытно-методическим работам были выбраны финальные параметры запуска АДСС и условия проведения работ:

1. Коэффициент усиления канала гидрофона (h-компонента): 1;
2. Коэффициент усиления канала геофонов (x,y,z-компоненты): 16;
3. Шаг дискретизации регистрации сейсмических данных: 1мс;
4. Оптимальное заглубление источника: 1 м;
5. При прохождении поезда: прерывать съемку и выполнять перестрел последних отстреленных пикетов в пределах 5 минут до и после прохождения поезда;
6. Время отстрела: $\pm 1,5$ часа от полной воды.

Заключение

По данным опытно – методических работ, проведенных на территории Нижнетуломского водохранилища, были выбраны параметры работы АДСС и условия проведения сейсмических работ, результаты которых подтвердили правильность выбора.

В результате анализа данных были подобраны оптимальные коэффициенты усиления, не подвергающие запись эффекту клиппирования. Так же установлен шаг дискретизации с учетом предварительного усиления, позволяющий с одной стороны восстанавливать частоты с максимальной точностью, с другой стороны использовать минимальный объем памяти. Заглубление источника сейсмических колебаний на 1 метр позволило увеличить удаления, на которых прослеживается преломленная волна. Помимо этого, опытно – методические работы подтвердили важность учета влияния железнодорожного транспорта и приливо – отливных течений р.Тулома. В результате чего были уточнены предельно допустимые интервалы отстрела.

Таким образом, в данной работе продемонстрирована значимость проведения опытно – методических работ, их влияние на результаты обработанных и интерпретированных сейсмических данных. Правильно выбранная методика обеспечивает решение поставленных задач со всей возможной полнотой, за минимальный срок и с наименьшими затратами.

Список литературы

1. Белоусов, А.В. Оптимизация систем наблюдений для изучения кинематических параметров среды в сейсморазведке 3D: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.00.10 – Российский государственный университет нефти и газа имени И.М.Губкина, Москва, 2006. - 105с.
2. Боганик, Г.Н. Сейсморазведка: Учебник для ВУЗов/ Г.Н. Боганик, И.И. Гурвич. - Тверь: АИС, 2006. – 744с.
3. Мелихова, Г.С. Методика поисково-оценочных работ на участках инфильтрационных водозаборов в долинах рек севера Кольского полуострова [Электронный ресурс]/ Г.С. Мелихова, Л.Б. Сычева//Разведка и охрана недр. – 2005 - №11. – Режим доступа: <http://www.hydrogeoecology.ru>
4. Проведение инженерных сейсморазведочных изысканий под строительство ж/д моста на р. Тулома: отчет о полевых сейсморазведочных работах по объекту/ ООО «Ларгео ТХ», ООО «Сейсмо-Шельф». Санкт – Петербург, 2014. - 45с.
5. Романов, В.В. Инженерная сейсморазведка – Москва, ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2015. – 278с.
6. Сейсморазведка (проектирование, техника и методика полевых работ): учебно – методическое пособие для студентов вузов/ Жемчужников Е.Г. – Санкт – Петербург, ООО «Сейсмо-Шельф», 2017. – 73с.
7. Состояние территории муниципального образования с.п. Тулома [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://gossmi.ru>